

**ANÁLISIS AERODINÁMICO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL DE UN VEHICULO FORMULA SAE**

ELABORADO POR:

Jacobo Mejía Quintana

CÓDIGO: 1088334209

CORREO: jacobomejia@utp.edu.co

MODALIDAD:

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

2020

**ANÁLISIS AERODINÁMICO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL DE UN VEHICULO FORMULA SAE**

Jacobo Mejía Quintana

**MODALIDAD:
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA**

**DIRECTOR DEL PROYECTO:
CARLOS ANDRÉS MESA MONTOYA
INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

2020

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Planteamiento del problema	6
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.3 Estructura del documento:.....	8
2 CONDICIONES DE DISEÑO.....	9
2.1 Normatividad	9
2.2 Dimensiones	12
2.3 Proceso de diseño.....	12
2.3.1 Flujo de trabajo.....	13
2.4 Proceso de construcción.....	15
3 CONCEPTOS AERODINÁMICOS.....	18
3.1 Teorema de Bernoulli	18
3.2 Fuerzas aerodinámicas	19
3.2.1 Fuerza de arrastre (drag).....	22
• Resistencia por fricción superficial.....	26
• Resistencia por interferencia	26
• Resistencia inducida (por sustentación o por la carga).....	27
3.2.2 Fuerza de sustentación (Lift)	27
3.3 Coeficientes aerodinámicos	28
4 Dinámica de fluidos computacional CFD	31
4.1 Método de volúmenes finitos	33
4.2 Planteamiento del flujo de trabajo.....	34
4.2.1 Identificación del problema	34
4.2.2 Pre-procesamiento	35
• Simplificación y corrección del modelo	36
• Creación del dominio.....	37
• Creación de malla	39
• Establecer condiciones de frontera.....	40
• Definir el modelo	40
4.2.3 Solucionador	41
4.2.4 Post-procesamiento/ resultados	42

4.2.5 Relación de parámetros	44
4.3 Flujo de trabajo detallado	44
4.4 Set up de la simulación	46
4.4.1 Configuración de la simulación	46
• Geometría	46
• Dimensiones.....	46
• Malla	47
• Parámetros de simulación	47
4.5 Set up 2D del fondo	48
4.5.1 Pre-procesamiento	51
• Geometría	51
• Variables	51
• Dimensiones.....	53
• Malla	54
• Modelo de turbulencia	56
• Velocidad de entrada (inlet).....	56
• Valores de referencia.....	56
5 Presentación y análisis de resultados	58
5.1 Simulación 3D	58
5.2 simulación 2D.....	62
5.2.1 Análisis de la altura “ride height”	62
5.2.2 Análisis del ángulo de difusor a 30mm de altura	66
5.2.3 Análisis del ángulo de difusor a 40 mm de altura	70
5.2.3 Análisis del ángulo de difusor a 50mm de altura	74
5.2.4 modificaciones morfológicas del fondo	79
6 Conclusiones, recomendaciones y aportes	82
6.1 Conclusiones	82
6.2 Recomendaciones.....	83
6.2.1 Geometría del fondo y difusor	83
6.2.2 Simulación.....	83
6.3 Aportes.....	84
7. Referencias.....	85

1. INTRODUCCIÓN

La formula SAE es una de las competencias internacionales de SAE International's Collegiate Design Series (CDS), organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices. El objetivo es la aplicación por parte de los estudiantes de herramientas de ingeniería en el desarrollo, diseño, construcción y pruebas de un vehículo tipo formula. Para competir con otros equipos y estudiantes de todo el mundo, en la cual se preparan en distintas disciplinas relacionadas con la industria automotriz y de movilidad. Esta competencia también requiere de presupuestos, comunicación, gestión de proyectos y gestión de recursos, todo bajo los requerimientos del reglamento de la competencia [1].

La aerodinámica juega un papel fundamental en los medios de transporte actuales, ya sea aéreo o terrestre, gracias a su influencia en el comportamiento dinámico de estos y su relación directa en el consumo de combustible. Las carreras brindan el espacio esencial para ahondar en aspectos que inciden sobre la dinámica de los vehículos como son la geometría de suspensión y dirección, transferencia de peso, frenado, balanceo, comportamiento de las fuerzas laterales entre otros. Permitiendo desarrollar metodologías de análisis de cada uno de los sistemas que compone un monoplace.

El diseño aerodinámico para la carrocería debe satisfacer diferentes requerimientos técnicos, de los cuales se puede resaltar: a) la reducción del arrastre (DRAG), b) control de flujo externo, c) diseño y manejo de flujo interno para ductos de refrigeración. [2]. Por último se debe resaltar la necesidad de que el diseño se ajuste a los diferentes procesos de manufactura, con el fin de que el producto final no tenga un costo elevado y cuente con una morfología funcional.

Para el estudio y análisis aerodinámico del vehículo, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se convierte en una herramienta fundamental, permitiendo analizar el comportamiento de las fuerzas que experimenta el vehículo al estar inmerso en el fluido bajo ciertas condiciones [3]. Esta herramienta permite, además, analizar contornos y distribución de velocidad y de presión, estableciendo zonas críticas que requieren mejoras dimensionales y morfológicas.

1.1 Planteamiento del problema

El equipo Colombia Racing Team de la Universidad Tecnológica de Pereira, nace con la iniciativa y el objetivo de ser el primer equipo Colombiano en participar en la formula SAE. Es un grupo conformado por estudiantes de distintas ingenierías y del SENA. El proyecto implica la elaboración de un plan de trabajo detallado, manejo de recursos, metodologías de diseño y fabricación, entre otros.

El vehículo es tipo formula, de configuración “open Wheel”, donde cada uno de sus componentes están regulados por la organización de la competencia. El monopla cuenta con algunas características tales como: a) un motor trasero Suzuki gsr600, b) chasis tubular tipo “space frame”, c) carrocería en fibra de vidrio con habitáculo al descubierto y d) fondo plano en aluminio.

En el apartado aerodinámico, el diseño de la carrocería existente contempla una base estructural y ergonómica confiable. Sin embargo, la morfología propuesta, no cuenta con un análisis técnico y de ingeniería que valide la eficiencia de su funcionamiento en cuanto a reducción de la resistencia aerodinámica. Los efectos que genera el fluido circundante respecto a la carrocería del vehículo se encuentran directamente relacionados con su diseño, donde la velocidad máxima y el aprovechamiento de la potencia del motor, son parámetros sensibles respecto a la morfología de la carrocería. No se ha realizado, entonces, un estudio detallado de los componentes aerodinámicos, a través del cual se puedan determinar las modificaciones necesarias para generar mejoras en el comportamiento aerodinámico de la carrocería.

Es por esto que se propone estudiar los métodos aplicados al análisis de flujo de un vehículo, que permitan comprender el efecto de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, conocer la distribución y contornos de velocidad y presión, para determinar la localización de aberturas para ductos de refrigeración. De igual manera, establecer las zonas críticas y poder aplicar las mejoras necesarias con el fin de reducir la resistencia al avance para un comportamiento dinámico más eficiente.

1.2 OBJETIVOS

Analizar el comportamiento aerodinámico de un vehículo tipo formula SAE, evaluando configuraciones morfológicas que mejoren el desempeño del monoplaça en cuanto arrastre y carga aerodinámica.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir de forma general el proceso de diseño y construcción de la carrocería, definiendo los aspectos dimensionales de esta, de acuerdo con lo establecido en el reglamento de la formula SAE.
- Estudiar los conceptos aerodinámicos aplicados a un vehículo de competición, y el proceso de análisis y trabajo sobre la dinámica de fluidos computacional (CFD), para el desarrollo aerodinámico de la carrocería.
- Establecer una estructura metodológica para el estudio de la carrocería del vehículo Formula SAE, utilizando la dinámica de fluidos computacional, considerando aspectos geométricos y condiciones de operación iniciales.
- Analizar los resultados obtenidos en CFD, con el fin de determinar las zonas críticas de la carrocería que afectan de forma significativa el arrastre y la carga aerodinámica del vehículo. Para establecer, de ser necesario, cambios en la morfología de la carrocería.

1.3 Estructura del documento:

En el capítulo 2 “Condiciones de diseño”, se describen las restricciones dimensionales, de diseño y construcción para la carrocería del monoplace, establecidas en la normatividad de la competencia, se presenta también el proceso de construcción de cada uno de los elementos que constituyen la carrocería, cumpliendo con lo establecido en el objetivo 1.

En el capítulo 3 “Conceptos aerodinámicos” se presentan conceptos aerodinámicos generales aplicados a los vehículos de competición, como fuerzas y coeficientes aerodinámicos, estableciendo los fundamentos para plantear un estudio en dinámica de fluidos computacional CFD. Respondiendo a lo planteado en el objetivo número 2.

En el capítulo 4 “Dinámica de fluidos computacional CFD”, se describen los parámetros, tipos de flujo y procedimiento a seguir en el uso de CFD, de igual manera se plantea una metodología de análisis detallada para el estudio aerodinámico del vehículo, se presentan los modelos y métodos de solución de la herramienta Fluent. Finalmente se muestra el proceso de configuración para la simulación 3d del monoplace y 2d del fondo plano. Respondiendo a lo planteado en el objetivo número 3.

Finalmente en el capítulo 5 “Presentación y análisis de resultados”, se muestran los resultados de la simulación 3D del vehículo completo, resaltando los puntos críticos y presentando las cargas aerodinámicas totales, se muestra también los resultados de la optimización del fondo plano del monoplace, la altura respecto al suelo y el ángulo del difusor. Respondiendo a lo planteado en el objetivo 4.

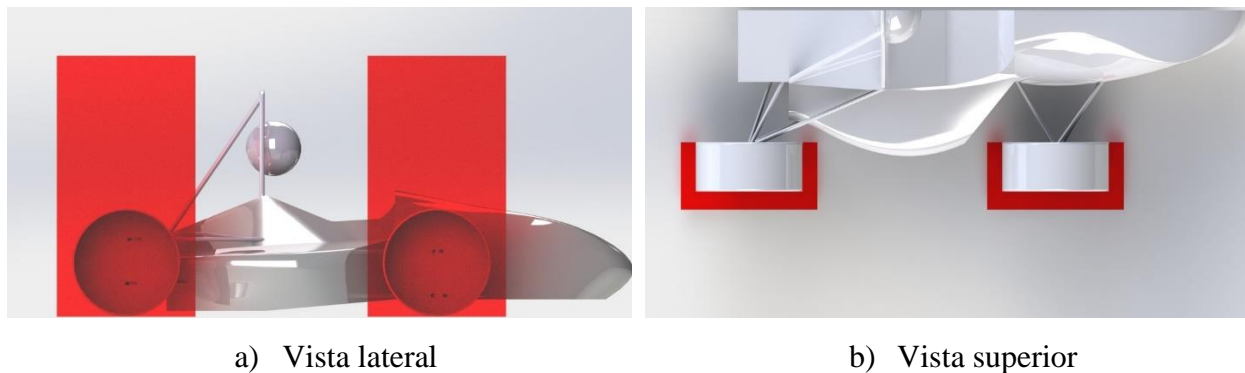
2 CONDICIONES DE DISEÑO

En este capítulo se describe el proceso de diseño y construcción de la carrocería, tomando como referencia el reglamento de la competencia y estableciendo las restricciones dimensionales pertinentes.

2.1 Normatividad

Según el numeral T2.1 “Configuración del vehículo” del reglamento, se establece que éste debe ser tipo formula, característico por su habitáculo abierto y llantas descubiertas. En la figura 1, se muestra en rojo las zonas alrededor de las llantas las cuales deben estar sin ningún tipo de obstrucción generada por algún elemento o parte del vehículo [4].

Figura 1. Restricciones para las llantas



Las dos franjas que se extienden verticalmente en la vista lateral (figura 1a)), sobresalen 75 mm hacia adelante y atrás de la cara de cada llanta. En la vista superior (figura 1b)), conservando las dimensiones antes mencionadas, la restricción resaltada con color rojo se extiende hasta la cara interior de las llantas. Esta zona debe estar libre de cualquier elemento aerodinámico, como deflector, bargeboard¹, entre otros. De igual manera los pontones (side pods) y los elementos que contienen los radiadores, tampoco pueden entrar en contacto con estas restricciones.

El numeral T2.2 “carrocería”, establece que no deben existir aberturas a través de la carrocería en la zona que comprende el compartimiento del piloto, el cual va desde la parte frontal hasta el para

¹ Elemento aerodinámico (tipo placa deflectora) usado para desviar la estela turbulenta, generada por las llantas del monoplaza, de la entrada a los pontones,

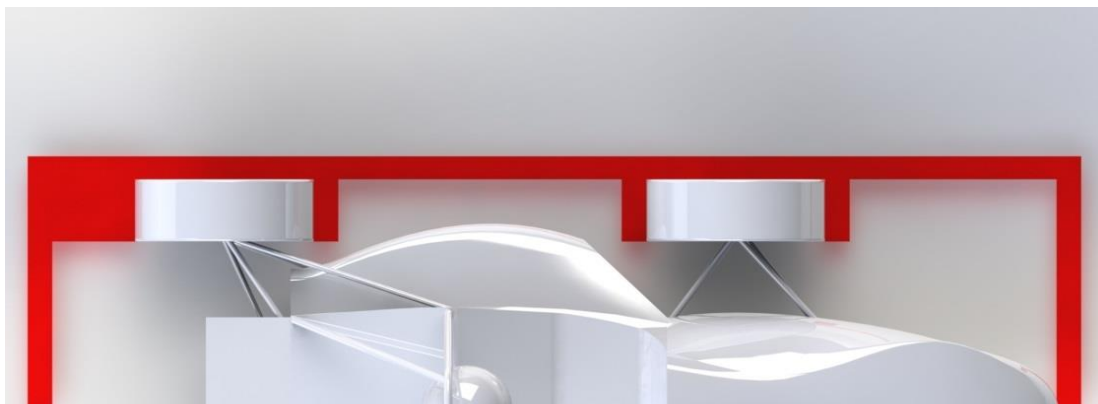
fuegos (firewall), a excepción de la abertura necesaria para el ingreso del piloto y para los anclajes de suspensión [5].

El artículo 9 del reglamento, “dispositivos aerodinámicos”, presenta las locaciones generales y restricciones para los elementos aerodinámicos que componen el vehículo [6]:

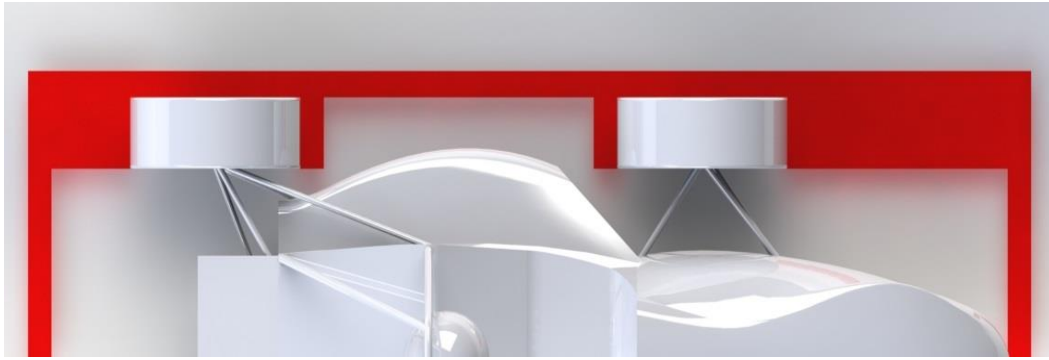
- En vista de planta, ninguna parte o dispositivo aerodinámico debe sobrepasar una distancia de 700 mm, medidos desde la cara frontal de las llantas delanteras, ni sobrepasar a lo ancho de la cara externa de las llantas.
- Tomando como referencia la vista frontal, cualquier parte de la llanta por encima de 250 mm medidos desde el suelo debe estar sin ningún tipo de obstrucción.
- En vista planta, ninguna parte o dispositivo aerodinámico debe sobrepasar una distancia de 250 mm medidos desde la cara posterior de las llantas traseras, ni sobrepasar a lo ancho la cara interna de las llantas.
- En vista lateral ninguna parte del alerón trasero o elemento aerodinámico (incluyendo los “endplates”), debe sobrepasar 1,2 m medidos desde el suelo sin el conductor estando en el vehículo.

La figura 2 muestra de forma esquemática las restricciones y locaciones de los elementos aerodinámicos y partes de la carrocería mencionados anteriormente.

Figura 2. Restricciones dimensionales



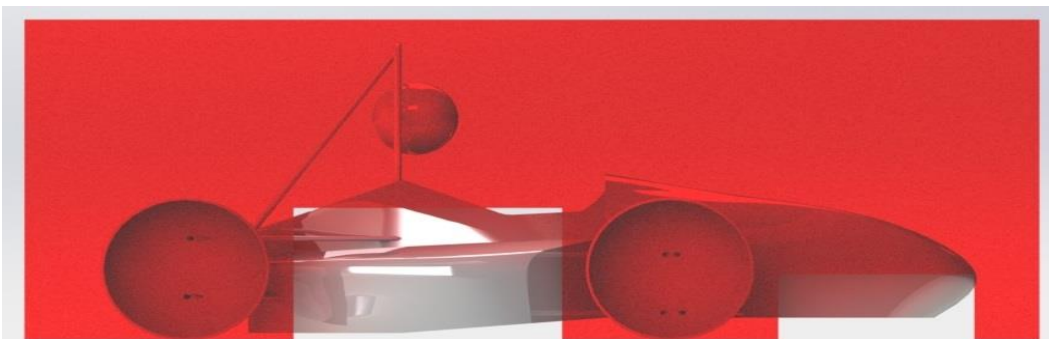
a) Restricción debajo de 250 mm desde el plano planta



b) Restricción entre 250-500 mm desde el plano planta



c) Restricción por encima de 500 mm desde el plano planta



d) Restricción para la ubicación de los pontones y alerón frontal

A excepción de alerón trasero o elementos del alerón frontal (que en vista frontal no obstruyen las llantas), ningún elemento aerodinámico o parte de la carrocería, debe exceder una altura de 500 mm medidos desde el suelo.

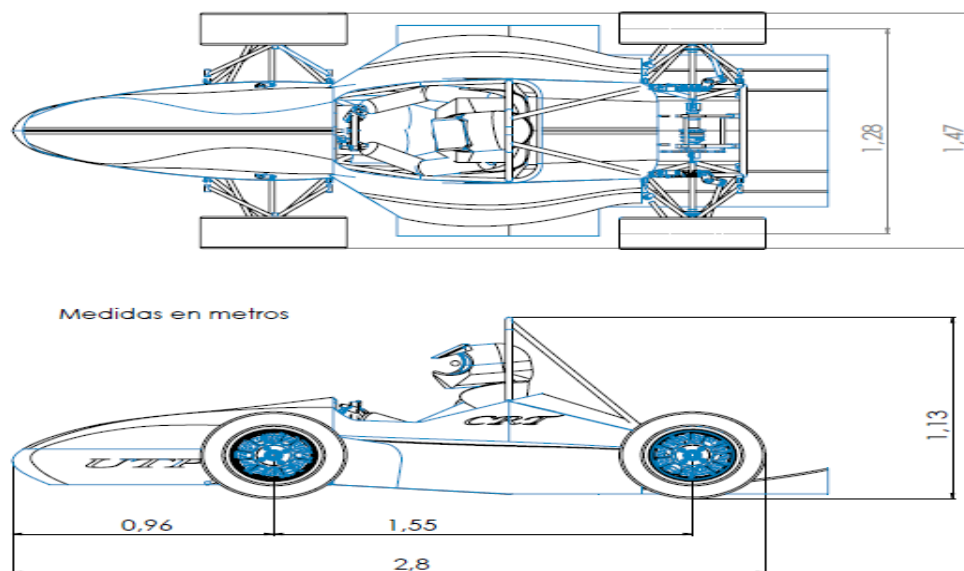
La figura 2d) muestra el espacio disponible para la ubicación de los pontones (side pods), y el alerón frontal en vista lateral.

Como nota general, cualquier dispositivo o parte de la carrocería que pueda entrar en contacto con una persona, debe tener un radio mínimo de 5 mm. En pista la carrocería no debe presentar vibraciones excesivas, ya que en este caso el carro puede ser retirado del circuito hasta que no se solucione el problema. Las restricciones y locaciones mostradas anteriormente permiten tener un punto de partida para el dimensionamiento de la carrocería.

2.2 Dimensiones

Las dimensiones finales del monoplaza acogidas a las restricciones del reglamento y objetivos del equipo, se presentan a continuación:

Figura 3. Dimensiones del monoplaza



2.3 Proceso de diseño

El proceso de diseño de la carrocería se hace buscando satisfacer diferentes requerimientos técnicos y económicos como son: a) generación de carga aerodinámica y reducción del arrastre, b) reducción del peso, c) control de flujo externo e interno, d) proceso de manufactura. Para esto, la carrocería se divide en los elementos principales definidos a continuación:

- Parte frontal
- Pontones

- Laterals
- Fondo plano

Cada uno de estos elementos juega un papel importante en el rendimiento aerodinámico del monoplaça, el cual está sujeto a las condiciones morfológicas y dimensionales propias del diseño de estos componentes. Adicionalmente el diseño y dimensionamiento de la carrocería depende también de elementos y sistemas del vehículo como: a) chasis, b) llantas, c) elementos de suspensión, entre otros.

El objetivo para un vehículo de competición, en lo que a la aerodinámica respecta, es conseguir la mayor carga posible con el menor **arrastre o drag**. Para esto existen una serie de elementos aerodinámicos que contribuyen en el incremento de la eficiencia, quienes permiten conseguir buenos resultados en pista. Las distintas configuraciones dependen de los objetivos de los equipos y las características del monoplaça.

2.3.1 Flujo de trabajo

El diseño de la carrocería comienza con el modelamiento de las superficies que otorga la morfología inicial. El cual se inicia en el momento en que se cuenta con el posicionamiento del piloto, las llantas, el motor y el chasis; para esto se usó el programa SolidWorks. El diseño de la carrocería se realiza con el debido posicionamiento de las superficies lo más cercanas posibles al chasis, con el objetivo de reducir el área frontal, pero sin alterar las transiciones suaves y fluidas en los empalmes. Lo anterior fue realizado con base en la regulación de la formula SAE, mediante bosquejos a mano alzada, buscando la mejor relación entre la función y la estética; esta última es esencial para obtener un diseño distintivo y original que permita diferenciarlo de los demás equipos.

Para iniciar con el proceso de diseño, se consideraron los siguientes parámetros:

- Dimensiones reglamentarias para el vehículo
- Proceso de manufactura
- Facilidad de ensamblaje
- Costos de producción
- Aerodinámica
- Estética

- Posicionamiento del piloto y visibilidad
- Posicionamiento de los elementos mecánicos del vehículo.

El equipo de trabajo dividió al vehículo en las siguientes áreas:

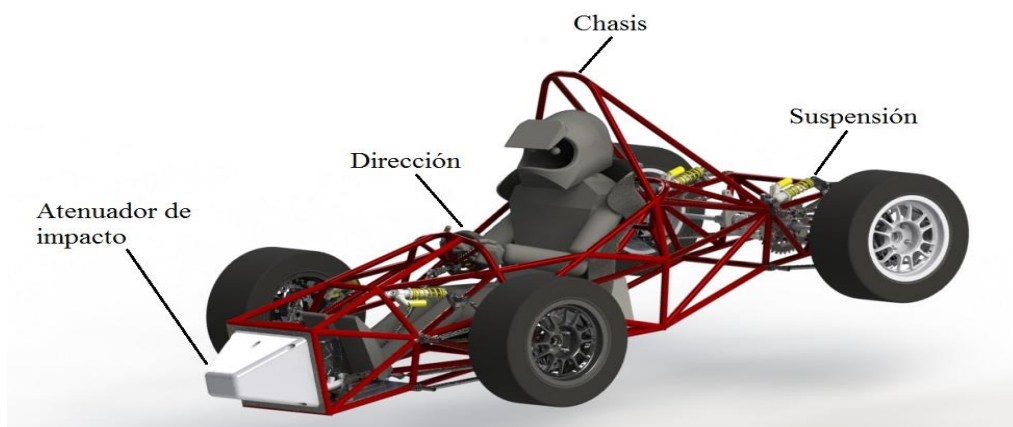
- Suspensión y dirección
- Chasis
- Motor y electrónica
- Habitáculo y seguridad
- Carrocería y aerodinámica.

Las líneas de la carrocería tienden a ser todas continuas, buscando reducir los cambios bruscos de forma que puedan alterar el flujo de aire. Adicional a esto, su forma, responde a conceptos aerodinámicos, los cuales buscan una reducción del área frontal, manejo adecuado de la distribución de presiones, entre otros.

Al tener establecida la morfología inicial de la carrocería, se genera una pieza sólida para el proceso de simulación computacional y otra para la manufactura. Suspensión

En la figura 4 se muestra el modelo CAD del vehículo diseñado por el equipo Colombia Racing Team.

Figura 4. Modelo CAD del monoplaza



a)



b)

Este diseño debe ser finalmente validado por simulaciones computacionales donde se determine y valide que cada uno de sus elementos cumple con las condiciones estipuladas en el reglamento, y desde el punto de vista aerodinámico establecer las fuerzas aerodinámicas de arrastre y lift, generadas por la interacción entre el fluido y el monoplaza.

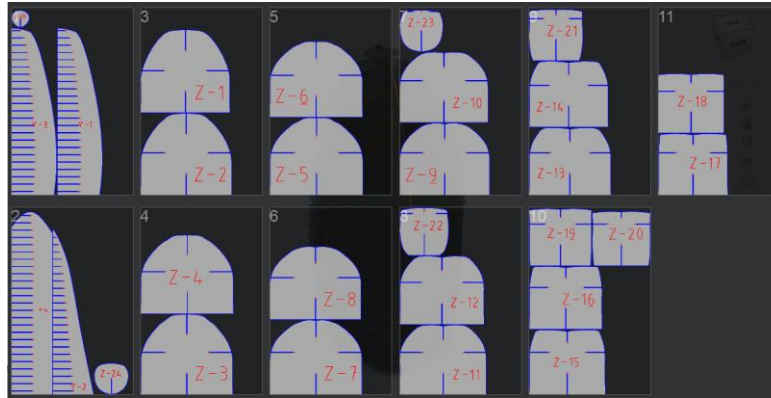
2.4 Proceso de construcción

En este apartado, se hará una breve explicación del proceso de manufactura de la carrocería que comienza con el diseño estructural de las cuadernas a partir del modelo CAD. Estas estructuras dan la forma base de la pieza y sirven de soporte para la fabricación del modelo a escala real. Para esto se usó el programa 123 D-make, que permite importar las piezas sólidas desde Solidworks y a partir de estas, realizar secciones transversales y longitudinales que representan una lámina de triplex debidamente marcada. Lo anterior facilita el posterior armado y conformado la base para el modelo de cada componente de la carrocería, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Cuadernas del modelo



a) Cuadernas parte frontal



b) Secciones de cuadernas

Después de cortar y armar las cuadernas, se recubren con los siguientes componentes: a) poliuretano tipo A y B, b) masilla y c) base. En esta etapa del proceso se le da acabado al modelo con un tratamiento de lijado hasta alcanzar una superficie uniforme y lisa. El acabado superficial en el modelo es importante ya que de este depende en gran medida la calidad de la pieza final. La rugosidad y acabado de las piezas afectan directamente el comportamiento aerodinámico general del monoplaza [7].

Sobre el modelo mostrado en la figura 6 se realiza un proceso de acabado y preparación final, este consiste en agregar 8 capas de cera desmoldante para facilitar la separación del molde.

Figura 6. Modelo de la carrocería



El molde se realiza con fibra Matt sin costura, reduciendo los costos del material. Una vez terminado, se le agrega cera y líquido desmoldante, y se ubican racores en puntos estratégicos que

ayuden con la adición de aire comprimido a la remoción de la pieza final de la carrocería. Esta copia el acabado de la cara interna del molde. Finalmente se prepara la carrocería, para realizar el proceso de pintura, acabado y ensamblaje final junto con los otros componentes del monoplaza.

En la figura 7 se muestra el monoplaza finalizado, con cada uno de sus componentes, la carrocería ya cuenta con la pintura, el fondo y los patrocinadores del proyecto.

Figura 7. Modelo final



3 CONCEPTOS AERODINÁMICOS

En este capítulo se hará una revisión a los conceptos aerodinámicos fundamentales para el estudio de comportamiento del monoplaza, conceptos como: a) número de Reynolds, b) Capa limite, c) Bernoulli y efecto Venturi, d) Coeficientes de arrastre y sustentación, e) fuerzas aerodinámicas, entre otros.

La morfología de la carrocería debe responder a ciertos criterios físicos buscando conseguir un mejor comportamiento aerodinámico del monoplaza. Antes de plantear un estudio en dinámica de fluidos computacional CFD, se deben conocer los efectos aerodinámicos que podrían estar presentes sobre el monoplaza, y tener claro el comportamiento del medio fluido (aire), y como este se comporta al entrar en contacto con el vehículo.

Antes de hablar de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos, es necesario entender el comportamiento del fluido, para esto comenzaremos con el teorema de Bernoulli.

3.1 Teorema de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli describe la relación entre la velocidad del fluido, en este caso el aire y la presión, esta fórmula se puede aplicar bajo ciertas consideraciones:

- Sin viscosidad
- Estable
- Flujo incompresible
- Sin adición de calor
- Cambios despreciables en altura

La ecuación establece que la presión estática, más la presión dinámica es igual a una constante en todo el flujo, esta constante es la presión total [8].

$$p_s + \frac{v^2}{2g} = p_t \quad (1)$$

donde

P_s	Presión estática
P_t	Presión total
$\frac{v^2}{2g}$	Presión dinámica

Analizando dos puntos en una misma línea de corriente se obtiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

El principio de Bernoulli es de gran ayuda para entender el comportamiento del fluido, tanto su velocidad como presión en un difusor o un perfil alar. Por ejemplo, el fondo plano del monoplaza y el difusor, se comportan de forma similar a un tubo de Venturi en el cual gracias a los cambios en el área de la sección transversal formada entre el fondo del monoplaza y la carretera, se generan cambios en la velocidad del fluido que se traducen en un aumento o disminución de la presión, lo que asociado a un área, genera carga aerodinámica.

3.2 Fuerzas aerodinámicas

A diferencia de la interacción entre dos cuerpos sólidos, el análisis en el caso de la interacción entre un objeto y un medio fluido, es más difícil de describir ya que el fluido puede cambiar su forma. De igual manera, el “punto de contacto” es cualquier punto en la superficie del cuerpo. La transmisión o aplicación de fuerzas mecánicas entre un cuerpo sólido y un fluido, ocurre en cada punto de la superficie del cuerpo. Y la transmisión se produce a través de la presión del fluido.

Las componentes principales de fuerza que resultan cuando un cuerpo está inmerso en un medio fluido y se desplaza a través de este son: la resistencia aerodinámica (drag force), y la carga aerodinámica (Downforce). Estas componentes se pueden combinar entre sí como vectores para dar una fuerza aerodinámica total resultante, esta fuerza aerodinámica es producto de las presiones que actúan sobre el cuerpo, estas diferencias de presión se pueden determinar de la siguiente manera.

$$p = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \quad (3)$$

donde

C_p = Coeficiente de presión

$\frac{1}{2} \cdot \rho v^2$ = Presión dinámica

Al multiplicar esta presión por el área sobre la cual está actuando, se determina la fuerza. Por ende de la ecuación de presión se pueden establecer las ecuaciones para la sustentación y resistencia aerodinámica.

Conociendo las condiciones de operación del vehículo, y datos como el coeficiente de arrastre y área de referencia (área frontal), es posible determinar la velocidad máxima del vehículo de acuerdo a la potencia que este posea, o de igual manera determinar la potencia que consumirá a determinada velocidad, esta expresión se basa en el cálculo de la resistencia o arrastre [9].

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \cdot A \quad (4)$$

$$Potencia = F \cdot v \quad (5)$$

$$Potencia = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (6)$$

donde

F Fuerza aerodinámica

C_d Coeficiente de arrastre

V Velocidad en (m/s)

ρ Densidad del aire

A Área de interés, generalmente área frontal o área plana del vehículo

A continuación se analizará el efecto que tiene la velocidad y el área de referencia en las fuerzas aerodinámicas.

Para analizar el efecto que tiene la velocidad en las fuerzas aerodinámicas se reescribe de nuevo la expresión, dejando constante los demás términos de la expresión.

$$F = Cte \cdot v^2 \quad (7)$$

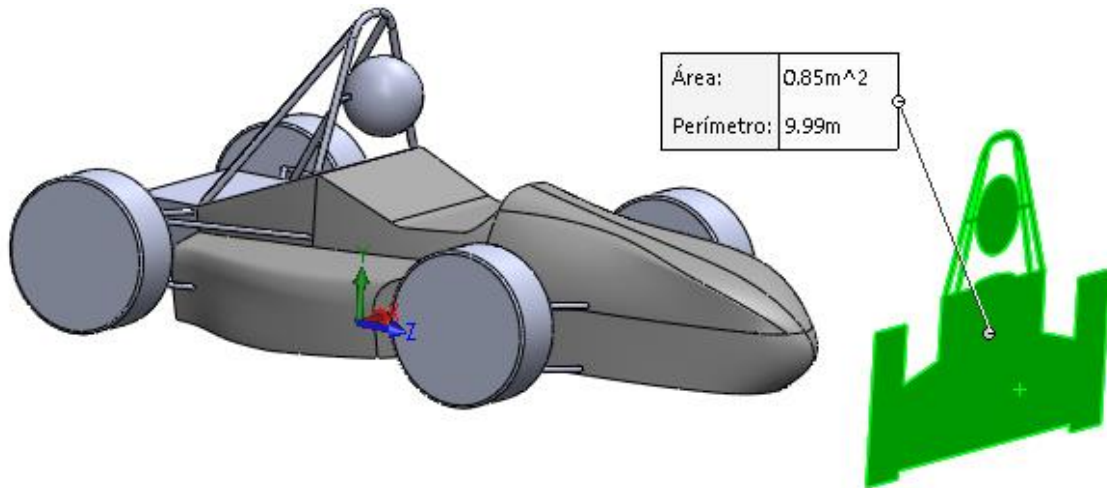
De acá es claro que al duplicar la velocidad, la fuerza aerodinámica se cuadruplica, esto aplica tanto para el arrastre (drag) como para la sustentación (lift). Las fuerzas aerodinámicas dependen del cuadrado de la velocidad.

El área de referencia también tiene un efecto directo en el comportamiento de las fuerzas aerodinámicas, la cantidad de arrastre generado por el objeto depende de su tamaño, el arrastre es una fuerza que depende de la variación de presión del aire alrededor del cuerpo a medida que este se mueve a través del aire, como se mencionó anteriormente la fuerza aerodinámica total es igual a la presión multiplicada por el área de superficie alrededor del cuerpo, al igual que la sustentación (lift), el arrastre es proporcional al área del objeto.

$$F = Cte \cdot A \quad (8)$$

En la figura 8 se muestra la proyección sobre un plano alzado, del área frontal del monoplaza con su respectivo valor.

Figura 8. Área de referencia



El área de referencia puede ser el área frontal, superficial o el área del alerón. En caso que se quiera comparar el coeficiente de elevación, dado que el coeficiente de arrastre se determina de forma experimental o por medio de la dinámica de fluidos computacional, midiendo el arrastre y el área, es posible usar cualquier área que sea fácilmente medible; por ende, si se elige el área frontal, el coeficiente de arrastre tendrá un valor diferente al que se obtendría eligiendo el área superficial, sin embargo la resistencia sería la misma, dado que los coeficientes están relacionados por las relaciones de área.

3.2.1 Fuerza de arrastre (drag)

La fuerza de arrastre es la componente de la fuerza aerodinámica neta a lo largo de la dirección de flujo. El arrastre depende de varios parámetros como la densidad del aire, el cuadrado de la velocidad, la viscosidad del fluido, el tamaño y la forma del objeto.

Hasta ahora se ha mencionado que el arrastre depende de la diferencia de presión generada por la interacción entre el cuerpo y el fluido, es en general la componente que más afecta el arrastre (drag) del vehículo, sin embargo el arrastre se debe principalmente a dos efectos:

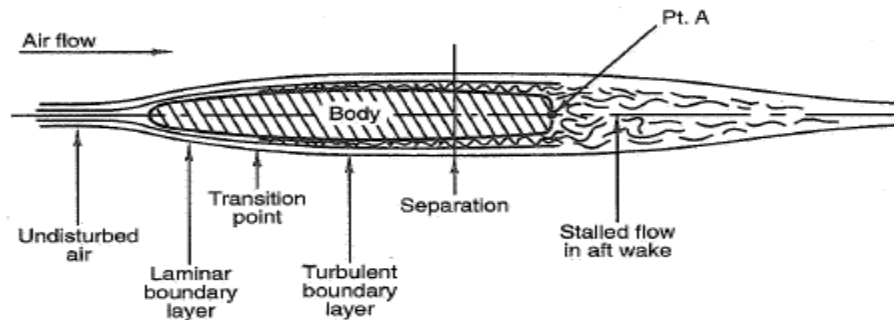
- Arrastre debido a la presión
- Arrastre debido a la fricción

La distribución de presión sobre el cuerpo es responsable en parte del arrastre y sustentación o carga aerodinámica del vehículo, sin embargo la fuerza debida a la fricción actúa paralela al cuerpo e incide únicamente en la componente del arrastre.

Las fuerzas de presión presentes en un flujo suave se pueden estudiar o predecir mediante el principio de Bernoulli mencionado anteriormente. Por otra parte, las fuerzas de corte se deben a la viscosidad del fluido y ocurren en la capa límite cerca al cuerpo.

En la siguiente imagen se presentan los tipos de flujo sobre la capa límite que se pueden presentar en un flujo bidimensional, esto con el objetivo de entender de mejor manera los efectos por la fricción o fuerzas cortantes y las fuerzas de presión.

Figura 9. Tipos de flujo sobre la capa límite



Fuente [10]

En este caso las fuerzas de presión actúan perpendicular al cuerpo. De ser un fluido ideal no se presentaría una capa límite, y por ende no existiría separación de flujo, en este caso la resultante de todas las componentes de fuerza de presión serían cero y existiría un punto de estancamiento en "A". Realmente existe una capa límite en la que se presenta una transición de flujo, de laminar a turbulento, las fuerzas de corte presentes en esta o estas capas extraen energía del fluido reduciendo su velocidad, más que todo en la zona posterior del cuerpo, lo que resulta en una separación de flujo, una estela turbulenta y en una zona de baja presión que actúa en la parte trasera, causando así lo que se conoce como arrastre de forma o arrastre debido a la forma, en este caso, del cuerpo.

Como se mencionó anteriormente, el arrastre en un vehículo se debe a la presión y a la fricción; sin embargo, esta última no es relevante en vehículos de competición como en el caso de la fórmula SAE. Esta empieza a ser relevante en vehículos tipo supermileage, o vehículos destinados a romper records de velocidad.

En el diseño de un vehículo formula SAE o cualquier otra categoría, se mitiga el efecto del arrastre debido a la fricción consiguiendo un buen acabado superficial, pero no se entra en detalle para analizar su efecto.

A continuación se presenta una forma de clasificar los componentes de arrastre (Drag), en función de las diferentes partes del vehículo que producen arrastre [11]:

- Arrastre debido a la forma exterior del vehículo
- Arrastre debido a las ruedas
- Arrastre debido a los dispositivos de control de flujo externo
- Arrastre debido al flujo interno (sistemas de enfriamiento y ventilación)
- Arrastre debido elementos irregulares como espejos, brazos de suspensión
- Arrastre por interferencia.

Cuando un cuerpo se encuentra inmerso en un medio fluido experimenta fuerzas y momentos de fuerzas que dependen básicamente de la forma del cuerpo y de su orientación respecto al flujo, la fuerza paralela al sentido del flujo es conocida como la fuerza de arrastre, al ser una fuerza se representa como un vector que, como se mencionó anteriormente, depende principalmente de dos efectos, la viscosidad de la corriente fluida y la distribución de presiones.

La ecuación que permite determinar la fuerza de arrastre es.

$$Drag = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \cdot A \quad (9)$$

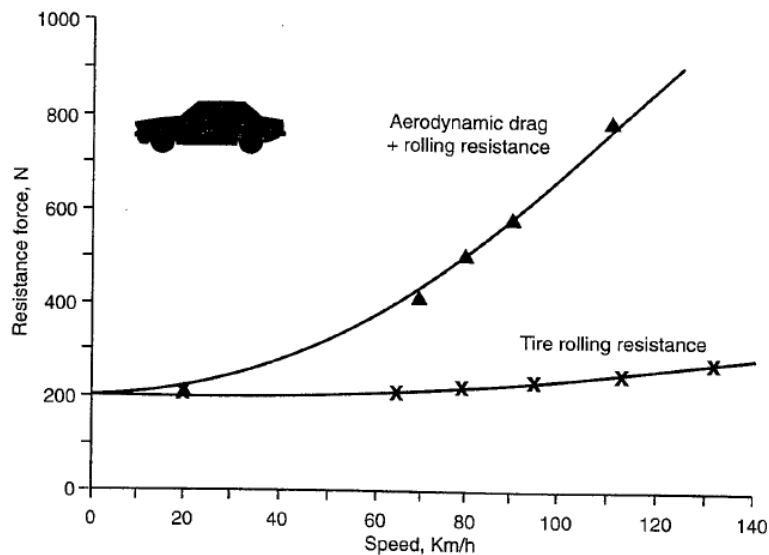
donde

C_d	Coeficiente de arrastre
v	Velocidad en (m/s)
ρ	Densidad del aire
A	Área de interés

De la ecuación es fácil deducir que, reduciendo el coeficiente de forma y el área frontal del vehículo, es posible reducir la resistencia aerodinámica. Adicional a esto, las cargas aerodinámicas aumentan con el cuadrado de la velocidad, siendo este uno de los factores más influyentes en la resistencia final.

En la siguiente imagen se muestra el aumento de la fuerza de arrastre al aumentar la velocidad del vehículo.

Figura 10. Variación del arrastre total del vehículo vs la velocidad



Fuente [12]

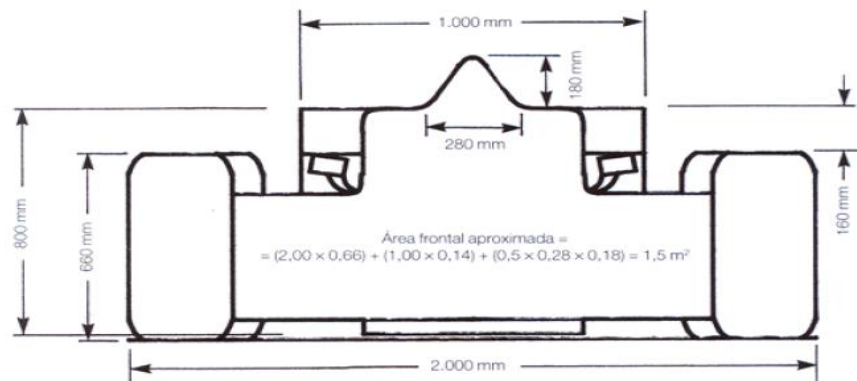
Como se evidencia en la imagen, la resistencia aerodinámica total aumenta rápidamente con el cuadrado de la velocidad, con forma de una curva parabólica.

Si se dividieran las fuerzas obtenidas por el cuadrado de la velocidad, para mostrar los resultados de forma adimensional, se obtendría una línea recta horizontal, llegando a la conclusión que los coeficientes de arrastre son independientes de la velocidad, y dependen exclusivamente de la forma del cuerpo (hablando en términos generales), pues más adelante se entrará en detalle a hablar acerca de los coeficientes aerodinámicos y se establecerá bajo qué condiciones se pueden tomar constantes o con pocas variaciones.

El área de referencia que se usa para calcular el arrastre total de los vehículos de competición o de calle es el área frontal de este, diferente al área de referencia que se usa por ejemplo para determinar

la carga producida por un alerón. En la siguiente imagen se muestra a manera de ejemplo la forma para determinar esta área de referencia.

Figura 11. Cálculo del área frontal



Sin embargo, esta puede ser calculada por medio de una herramienta, que se proyecta sobre un plano frontal el contorno del vehículo y se calcula el área encerrada por el contorno, programas como ANSYS-Fluent permiten definir y calcular esta área directamente.

La resistencia aerodinámica puede ser producto de las siguientes causas:

- Resistencia por fricción superficial

Aparte del acabado, se busca que la carrocería tenga menor área superficial. El acabado de la carrocería y la forma como esta afecta el flujo de fluido se relaciona directamente con el número de Reynolds (Re), este es el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido. Por ende, las condiciones de flujo de fluido dependen directamente de la velocidad, ya que esta afecta sobre un mismo objeto la naturaleza del fluido ya sea laminar o turbulento.

- Resistencia por interferencia

La resistencia que tienen dos elementos por separado no necesariamente es el doble cuando interactúan entre sí; esta puede ser superior debido a la interferencia que se presenta en el flujo de fluido. Generada por los dos elementos. Por esto en ocasiones, cuanto el efecto de la resistencia

aerodinámica es crítica, se busca carenar los tubos del chasis, suspensión, entre otros, y se debe evitar dejar aristas vivas en las uniones de dos o más elementos, esto con el fin de disminuir el efecto por interferencia.

- Resistencia inducida (por sustentación o por la carga)

Siempre que se genera carga aerodinámica, se genera a la vez un componente de arrastre, además cuando se genera carga, se da por unos deltas de presión, y el flujo de alta presión siempre busca rellenar el flujo de baja presión lo que consume energía. Para esto se establece una eficiencia aerodinámica que corresponde a la siguiente relación.

$$\frac{L}{D} = \frac{C_l}{C_d} \quad (10)$$

3.2.2 Fuerza de sustentación (Lift)

La fuerza de sustentación (lift), es una fuerza aerodinámica generada por un cuerpo que se mueve a través de un fluido, es la componente perpendicular a la dirección de flujo, esta fuerza actúa a través del centro de presión del objeto.

La ecuación usada para el cálculo de la carga aerodinámica es muy similar a la empleada para la resistencia (drag), Como se muestra a continuación:

$$Lift = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot A \quad (11)$$

donde

C_l	Coeficiente de sustentación
V	Velocidad en (m/s)
ρ	Densidad del aire
A	Área de interés

3.3 Coeficientes aerodinámicos

Estos son coeficientes adimensionales y representan medidas relativas de cuanta sustentación y resistencia puede generar un cuerpo [13].

Podría decirse que con solo mirar un vehículo, es fácil determinar -analizando solo su forma- si este tiene un alto o bajo coeficiente de arrastre. Sin embargo, no es tan sencillo en el caso del coeficiente de sustentación.

Como se mencionó anteriormente, el arrastre incrementa con el cuadrado de la velocidad. Para obtener los coeficientes aerodinámicos adimensionales es necesario dividir la expresión que se muestra a continuación por la velocidad al cuadrado, estos coeficientes no dependerán de la velocidad del vehículo, sino de su forma, las expresiones para el coeficiente de arrastre (C_d), y el coeficiente de sustentación (C_l) son:


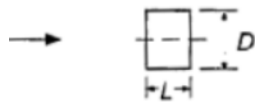
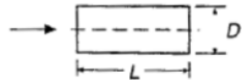




$$C_l = \frac{\text{Sustentación (lift)}}{\frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \cdot A} \quad (12)$$

$$C_d = \frac{\text{Arrastre (drag)}}{\frac{1}{2} \cdot \rho v^2 \cdot A} \quad (13)$$

Con relación a las expresiones de los coeficientes aerodinámicos es necesario hacer unas aclaraciones. El área (A), es un área de referencia; para aplicaciones automotrices se usa el área frontal de los vehículos en el cálculo del arrastre y de los coeficientes; por otra parte, es evidente que a mayor área frontal los coeficientes tienden a ser menores si se mira únicamente la ecuación, es por esto que para comparar varios vehículos, se usa la resistencia total ($C_d \cdot A$), que es el producto del coeficiente de arrastre por el área Frontal [14]. Hoy en día los vehículos de calle por ejemplo, tienden a ser más grandes, es por esto que los fabricantes buscan la manera de reducir al máximo el coeficiente de forma (C_d), compensando el incremento en el área frontal.

En la siguiente imagen se muestran unos coeficientes típicos para distintas configuraciones.

Figura 12. Coeficientes aerodinámicos típicos

			C_l	C_d
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Fuente [15]

El coeficiente de arrastre es una cantidad adimensional, usada para cuantificar la resistencia que presenta un objeto en un medio fluido, este término se usa en la ecuación de resistencia, ya que simplifica en una expresión todas las dependencias complejas que inciden en el arrastre como son: las condiciones de flujo, la forma, entre otros.

El coeficiente de arrastre expresa la relación entre la fuerza de arrastre y la fuerza producida por la presión dinámica multiplicada por el área.

Esta expresión permite calcular el coeficiente de arrastre en un entorno controlado, en el cual se puede establecer la velocidad, densidad y el área, para así medir el arrastre producido, y determinar el coeficiente de arrastre (drag). Utilizando la ecuación del arrastre, es posible predecir el arrastre que se producirá bajo una velocidad, densidad y área.

El coeficiente de arrastre contiene también los efectos de la viscosidad y compresibilidad del aire. Para velocidades bajas (menor a 320 km/h (200 mph)), los efectos de la compresibilidad del fluido son despreciables, es importante de igual manera considerar los efectos de la viscosidad del aire en el caso de estudio, para esto se recurre al número de *Reynolds*, este expresa la relación entre la fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas del fluido.

Si dos objetos tienen la misma área de referencia, y se mueven a la misma velocidad dentro de un fluido, entonces la fuerza de resistencia aerodinámica que experimentan será proporcional a sus respectivos coeficientes de arrastre. Para aplicaciones automotrices, se usa el área frontal de los vehículos en el cálculo del arrastre y de los coeficientes. Por otra parte. Es evidente que a mayor área frontal, los coeficientes tienden a ser menores si se mira únicamente la ecuación, es por esto que para comparar varios vehículos, se usa la resistencia total ($C_d \cdot A$), que es el producto del coeficiente de arrastre por el área Frontal [16].

El coeficiente de arrastre, no es constante, depende de varios parámetros como son: la velocidad del aire, dirección del flujo, la posición del objeto, el tamaño y forma del objeto, densidad y viscosidad del fluido.

El coeficiente de arrastre es entonces función del número de Reynolds y el número de Mach. Sin embargo, para algunas aplicaciones en el caso automotriz, el número de Reynolds varía poco a ciertas velocidades, y la dirección de flujo se mantiene; bajo estas condiciones, el número del coeficiente puede ser tomado constante.

La ecuación del coeficiente de sustentación (lift), es similar a la del coeficiente de arrastre, pero relaciona la fuerza de sustentación con la fuerza producida por la presión dinámica multiplicada por el área de referencia.

Dada su complejidad, tanto el coeficiente de sustentación (lift) como el coeficiente de arrastre (drag), se encuentran ya sea por métodos experimentales como el túnel de viento, o por medio de la dinámica de fluidos computacional [17].

4 Dinámica de fluidos computacional CFD

En este capítulo se plantea un flujo de trabajo en el cual se establecen las consideraciones necesarias para el estudio aerodinámico del monoplaza, como son: la geometría, mallado, propiedades del fluido, entre otros. De igual manera, se hará una breve descripción del funcionamiento y los principios de la dinámica de fluidos computacional.

En el flujo de trabajo propuesto, se expondrán los pasos básicos en el proceso de simulación como son el pre-procesamiento, post-procesamiento y análisis de resultados.

La dinámica de fluido computacional o CFD, es un método usado para predecir el flujo de fluido, calor, transferencia de masa y reacciones químicas. Para predecir estos fenómenos, ANSYS resuelve ecuaciones de conservación de masa, segunda ley de Newton, ley de conservación de la energía, entre otras.

La dinámica de fluidos computacional puede ser usada para obtener información detallada sobre distribución de presión, velocidad, temperatura; también para obtener datos de fuerzas aerodinámicas como arrastre (drag) y sustentación (lift). El CFD es una herramienta usada en todas las etapas de procesos de ingeniería, desde el diseño conceptual hasta el producto detallado, optimización, etc. [18].

Antes de hablar del método que usa ANSYS, se describen a continuación los tipos de flujo que pueden estar presentes en un caso de estudio. Para el interés del presente trabajo se destaca la capacidad del CFD para realizar simulaciones de flujo ya sea laminar, turbulento, de una o varias fases.

Desde el punto de vista del modelado CFD es útil separar los flujos posibles en las siguientes categorías [19].

- Laminar-Turbulento
- Estable-Transitorio
- Una sola etapa-Multifásico

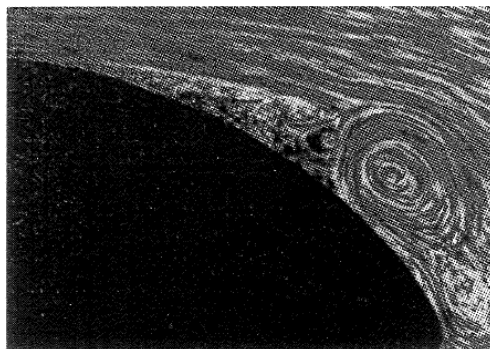
Flujo laminar: es un flujo en el cual las partículas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas, formando así en conjunto capas o laminas. El fluido se mueve sin que haya mezcla significativa de partículas de fluido cercanas. Se describe el flujo laminar “como un patrón bien ordenado donde se supone que las capas de fluido se deslizan una sobre otra.” [20]

Flujo turbulento: se caracteriza por ser un flujo caótico y desordenado, este tipo de flujo se relaciona más con un fluido real.

Si se considera a la capa límite del aire en la superficie del cuerpo en estudio, la cual podría ser un perfil alar o en este caso el vehículo, las fuerzas cortantes en esta capa (efectos viscosos) son importantes, estas fuerzas tienen a “frenar” el flujo de aire, removiendo energía de la corriente de aire; este fenómeno depende de la distancia a la que el aire fluye a lo largo de la superficie, el espesor de la capa límite tiende a aumentar a lo largo de la superficie; por lo generar esta capa límite tiende a ser turbulenta, esto quiere decir que las partículas de aire se mueven con velocidades aleatorias y cambiando su distancia respecto a la superficie del cuerpo constantemente.

A medida que el aire continúa moviéndose a lo largo de la superficie, la capa límite turbulenta aumenta su espesor a medida que el aire en la capa límite pierde energía gracias a la fricción superficial. Este fenómeno ocurre generalmente en la parte posterior del cuerpo donde la corriente de flujo libre se desacelera y la presión se incrementa, este incremento de presión junto con la ausencia de energía en la capa límite, pueden crear un flujo inverso en la superficie que se conoce como la condición de separación de flujo.

Figura 13. Formación de estela turbulenta



Fuente [21]

Flujo estable: en CFD es el flujo que luego de la convergencia se mantiene incambiable, es decir que las variables no cambian con el tiempo [22].

La capa límite pasará de laminar a turbulento si el número de Reynolds del flujo alrededor del cuerpo es suficientemente grande. A medida que se incrementan las velocidades, el tamaño de los objetos es mayor y la viscosidad del fluido más baja, contribuyen a números de Reynolds más elevados.

Flujo inestable: este tipo de flujo se identifica ya que las características en un punto determinado son variables con el tiempo.

ANSYS-Fluent se basa en el método de volúmenes finitos, en el cual se toma un cuerpo y se divide en una cantidad finita de volúmenes, eso se hace por medio del mallado, para cada uno de estos volúmenes el programa resuelve una serie de ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Navier Stokes.

4.1 Método de volúmenes finitos

Para los problemas de mecánica de fluidos, el método usado es el método de volúmenes finitos; este es uno de los métodos de solución para análisis computacional más conocido, se usa cuando se manejan flujo de fluidos como en este caso el aire.

El método de volúmenes finitos, por medio de mallas, soluciona los parámetros de la simulación, en el principio usado en *Fluent*, lo que sale de una celda de la malla, entra en la celda del lado, en este proceso, se conserva la masa y el momento lineal. [23]

El principio de este método es la conservación local. Para resolver numéricamente las ecuaciones con el método de volúmenes finitos, el dominio computacional completo es dividido en sub volúmenes más pequeños llamados celdas. Empleando la ley de Gauss, las derivadas parciales expresan un principio de conservación, se pueden reescribir en cada celda como una contribución algebraica. La ecuación de gobierno expresada en ecuaciones diferenciales parciales se reformula en cada celda computacional en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales, usualmente estas ecuaciones son solucionadas numéricamente de forma iterativa. Esto se conoce como *desratización*, pero esto introduce al mismo tiempo un error, es importante controlar la magnitud de este error una vez se obtiene la solución, generalmente reducir el tamaño de la celda tiene un efecto directo en la reducción de este error. Sin embargo, reducir demasiado este tamaño crea

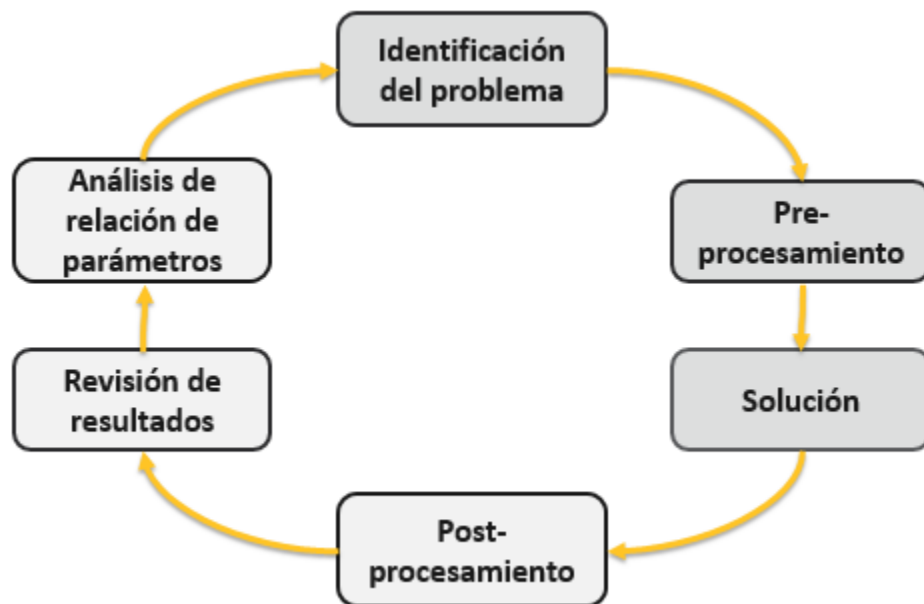
innecesariamente una gran cantidad de celdas, lo que aumentará el esfuerzo computacional y los tiempos de simulación. Por lo que encontrar una rápida pero a la vez precisa solución del problema en CFD, es una de las tareas más importantes para los ingenieros de CFD [24].

4.2 Planteamiento del flujo de trabajo

En este apartado se plantea un flujo de trabajo, con el objetivo de tener un procedimiento claro en el proceso de simulación del monoplaza. Cada uno de los puntos que se muestran tienen unos pasos que se deben identificar y aplicar para obtener el mejor resultado posible, que se asemeje al comportamiento real del monoplaza en la pista.

De forma general, el flujo que se seguirá para todo el proceso de simulación del monoplaza se muestra en la figura 14.

Figura 14. Flujo de trabajo general



Este flujo de trabajo puede ser iterativo, quiere decir que una vez se finalice la simulación, y se identifiquen posibles mejoras, en caso de ser necesario, se repetirán los pasos que se explicarán a continuación.

4.2.1 Identificación del problema

La identificación del problema está relacionada con las consideraciones que se deben tener en cuenta antes de iniciar con el proceso de simulación:

- Línea de tiempo del proyecto
- Tiempo disponible para el proyecto
- Grado de detalle y complejidad de la simulación
- Literatura guía o de referencia
- Restricciones de componentes
- Restricciones de manufactura
- Restricciones de pruebas.

En las consideraciones generales, es fundamental establecer el tiempo que se puede destinar a cada etapa del proceso, desde el diseño, manufactura y pruebas, ya que este puede estar directamente relacionado con la complejidad o detalle al cual se puede llevar el proyecto, es importante también investigar desarrollos de otros equipos, con el fin de tener una idea general de las investigaciones previas que se han realizado, y de igual forma contemplar los problemas que se pueden presentar de manera general.

Otra consideración a resaltar son las restricciones constructivas, el diseño aerodinámico y total del vehículo no solo se queda en un proceso de modelamiento CAD y validación computacional, sino que cada uno de los componentes que componen el auto deben ser manufacturados, es por esto que desde la misma concepción del diseño, se debe evaluar la complejidad que puede representar el proceso constructivo de cada una de las partes del monoplaza, en este caso el de la carrocería. Para esto es necesario saber qué herramientas y materiales están disponibles, de lo contrario se corre el riesgo de invertir tiempo en el desarrollo de un componente que no se puede construir.

4.2.2 Pre-procesamiento

El pre-procesamiento es la actividad en la cual se le da entrada al problema de flujo, las actividades en la etapa de pre-procesamiento implican:

- Definición de la geometría de interés: y el dominio computacional
- Realizar la subdivisión del dominio en una serie de subdominios más pequeños, mallado.
- Seleccionar el fenómeno físico que debe ser modelado
- Definir las propiedades del fluido
- Especificar las condiciones de contorno.

La solución a un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura etc.) se define en los nodos dentro de cada celda de la malla. La precisión de una solución CFD se define por el número de celdas en la cuadrícula. En general cuanto mayor sea el número de celdas, la precisión de la solución es mejor.

Claro está que entre mayor sea el número de elementos de la malla, la demanda computacional también lo será. Sin embargo, para optimizar este proceso a menudo las mallas no son uniformes, en vez de esto, su densidad cambia cuando se detectan cambios bruscos en la geometría; o de ser necesario, el usuario puede definir parámetros como tamaño, densidad, entre otros, para alcanzar la calidad de malla necesaria para obtener los resultados adecuados sin afectar de forma significativa en el tiempo computacional.

Más del 50% del tiempo dedicado a la industria en un proyecto de CFD se dedica a la definición de la geometría del dominio y la generación de la malla [25].

Como se mencionó anteriormente, parte del pre-procesamiento está en la definición de la geometría de interés. Esta geometría se diferencia del modelo completo del vehículo ya que este cuenta con detalles que son innecesarios para la simulación de flujo, y en caso de permanecer, el costo computacional puede ser mayor; para esto se realiza una simplificación del modelo CAD.

- **Simplificación y corrección del modelo**

El diseño del vehículo que se realiza por medio de software CAD Solidworks generalmente presenta una complejidad elevada, esto gracias a la cantidad de detalles que un modelo completo del vehículo requiere para su manufactura; sin embargo, este nivel de detalle no es necesario para la simulación aerodinámica, adicional a esto, importar un modelo completo del auto incrementa la posibilidad de errores en la geometría, y el tiempo computacional necesario para la creación de la malla.

Durante la preparación para una simulación en CFD se debe garantizar una correcta definición de la geometría totalmente conectada, ya que generalmente la geometría no es creada en el software usado para la simulación, en este caso ANSYS-Fluent. El primer paso una vez se importa la geometría, es realizar las correcciones pertinentes.

Los errores se pueden presentar ya sea por el proceso mismo de diseño o por la exportación de los archivos, Exportar estos archivos del software CAD a un formato de archivo neutral (IGES, STEP, SAT, entre otros.) puede introducir representaciones erróneas en la geometría las cuales deben ser corregidas para poder pasar a las siguientes etapas en el pre-procesamiento.

La figura 15 muestra el vehículo en detalle y su simplificación para la simulación aerodinámica. Este modelo simplificado se caracteriza por conservar la forma base de la carrocería y su simplificación en elementos como las llantas, el piloto y la suspensión.

Figura 15. Simplificación del modelo computacional



- **Creación del dominio**

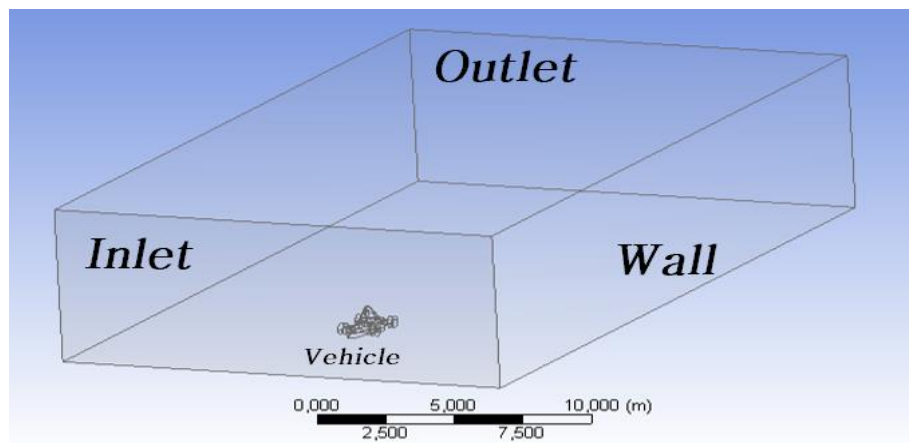
Para el análisis de flujo aerodinámico externo, el fluido computacional representa un túnel de viento virtual, en la etapa de pre-procesamiento se deben seleccionar con cuidado las dimensiones del dominio ya que en este tomará lugar la simulación en CFD; se debe garantizar que exista siempre espacio suficiente entre la entrada, el cuerpo en estudio y la salida, esto para que los vórtices generados cuando el aire pasa por el vehículo no afecten o perturben la solución. De igual manera la distancia a las paredes del dominio deben ser tales que el flujo que pasa por el vehículo no interactúe con estas generando errores en los resultados. En la literatura se pueden encontrar varias dimensiones relacionadas al dominio computacional, estas dependerán de la exactitud que

se busque en el análisis, el tiempo destinado para la simulación y los recursos computacionales con los que se cuente, para el caso del vehículo en estudio dada las características del diseño al ser simétrico, es posible hacer la simulación de la mitad del auto, lo que implica un menor gasto computacional sin afectar los resultados que se puedan obtener.

“Según Ioannis Oxyzoglou, La entrada (inlet) al túnel de viento generalmente se coloca alrededor de 4-5 veces la longitud característica por delante de la geometría y se define una velocidad de entrada en él. Respectivamente, la salida (outlet) del túnel de viento se coloca entre 8 y 10 veces la longitud característica detrás de la geometría y se considera una salida de presión, mientras que las paredes (walls) laterales del dominio se colocan entre 2 y 3 veces más la longitud característica. Típicamente, la relación de la sección transversal del vehículo a la sección transversal del túnel de viento está dentro de un cierto rango. Esta relación se denomina relación de bloqueo y debe ser inferior al 6% o incluso inferior al 2% según la velocidad de entrada y el tipo de resultados que el usuario desee examinar en cada caso” [26].

La figura 16 muestra el dominio computacional usado para la simulación 3D del monoplaza.

Figura 16. Dominio computacional



Como se mencionó, las dimensiones del dominio pueden variar según los recursos computacionales con los que se cuenta, y la precisión deseada en el proceso. Como referencia, estos valores se toman en función de la longitud del monoplaza; estas dimensiones pueden ser:

Inlet: L

Height: L

Width: L

Outlet: 3L

- **Creación de malla**

El proceso de mallado es fundamental ya que la precisión y resolución de los datos dependerá no solo del tamaño de la malla (cantidad de elementos), sino del tipo de elemento que se use, y de los tratamientos adicionales que se le hagan al cuerpo en las zonas críticas (cambios de geometría bruscos, cambios de presión significativos etc.), en un vehículo formula SAE, la presión o la resistencia debida a la forma del auto son predominantes por encima de la resistencia por fricción.

Dado que la precisión de los datos de arrastre y carga aerodinámica, está en función de la distribución de presión estática en la superficie del auto, al mismo tiempo esta distribución se ve afectada por la calidad de la malla y las zonas de separación de flujo. A lo largo de las superficies sólidas del vehículo, existe una capa límite, por lo tanto el mallado debe garantizar que existan varios puntos en dirección normal a la superficie que permita modelar la variación de la velocidad a través de la capa límite. Otro caso en el que se debe contar con un mallado más refinado es donde existe una gran curvatura en la superficie que causa una variación de presión rápida en la dirección del flujo, finalmente también es necesario crear una malla refinada en las zonas que se alejan de las superficies sólidas y presentan grandes gradientes de flujo como la estela detrás del auto.

Como se mencionó anteriormente, sobre las superficies del auto se presenta una capa límite; es fundamental que el mallado capte la formación de esta capa límite, para esto se usa una cuadrícula fina cerca de la superficie del modelo. La densidad de las celdas, dependerá del tipo de capa límite (laminar o turbulenta), en caso de ser turbulenta dependerá también del modelo de turbulencia usado, las capas que se usan en el mallado de la capa limite consisten en elementos rectangulares, y para el mallado general del vehículo, Uno de los elementos más comunes y sencillos en el proceso de mallado CFD son los elementos triangulares.

- **Establecer condiciones de frontera**

En este apartado del pre-procesamiento es necesario definir las condiciones de frontera iniciales, que corresponden a las condiciones de entrada (inlet), y las condiciones de salida (outlet), también se hacen las definiciones de las propiedades del fluido, esto se mostrará en detalle más adelante.

- **Definir el modelo**

En el comportamiento del flujo alrededor del vehículo presenta una estela turbulenta, esta tiene estructuras pequeñas y de gran tamaño, el flujo turbulento como ya se ha mencionado, es desordenado y puede ser impredecible, por lo que el programa cuenta con tres aproximaciones básicas con el fin de captar este comportamiento turbulento, estas son:

- DNS (Direct Numerical Simulation)
- LES (Large Eddy Simulation)
- RANS (Reynolds Averaged Navier-stokes Simulation)

El DNS como el LES, demandan altos recursos computacionales para la mayoría de aplicaciones, el más usado es el RANS, muchos modelos se pueden usar con este, estos modelos RANS, se pueden clasificar según la cantidad de ecuaciones agregadas a la lista de ecuaciones de Navier-Stokes, a medida que se agregan más ecuaciones, la demanda computacional se incrementa. Los modelos de turbulencia RANS se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Modelos de turbulencia RANS

Modelos de turbulencia RANS	
Modelo de una ecuación	Spalart-Allmaras
Modelos de dos ecuaciones	K- ϵ family (Standard, RNG, Realizable) K- ω family (Standard, BSL, SST) Reynolds Stress Model
Transition Models	K-Kl- ω , Transition SST and Intermittency models

Para el análisis aerodinámico de los equipos FSAE, se recomienda el uso del modelo K- ω SST, este puede ser usado para predecir la capa límite y la separación de flujo, otro modelo válido para la simulación de fluidos sobre superficies de vehículos es el K- ϵ [27; 28].

En este documento no se entrará en detalle sobre los modelos de turbulencia con los que cuenta el programa, la selección de los modelos se realizó a base de referencias bibliográficas relacionadas con el estudio aerodinámico de vehículos, especialmente tipo formula, los términos K y ϵ hacen referencia a la energía cinética y tasa de disipación de la turbulencia, ω es la tasa de disipación específica [29].

A modo general, las ecuaciones de Navier-Stokes, describen la relación entre la velocidad, presión, temperatura y densidad de un fluido en movimiento; estas ecuaciones incluyen también los efectos viscosos en el fluido. Las ecuaciones son un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas y su solución analítica es de alta complejidad, es por esto que se han buscado simplificaciones o el uso de la dinámica computacional por métodos como el de elementos finitos o volúmenes finitos para tratar de darle solución a problemas de flujo de fluidos.

4.2.3 Solucionador

Existen tres tipos diferentes de solución numérica: diferencias finitas, elementos finitos y métodos espectrales. Para fines del presente trabajo solo se tendrá en cuenta el método de volúmenes finitos,

una formulación de diferencias finitas especial que es fundamental para los códigos de CFD: CFX/ANSYS, Fluent, entre otros.

El algoritmo numérico consiste en los siguientes pasos:

- Integración de las ecuaciones que rigen un flujo de fluido sobre todos los volúmenes de control del dominio
- Desratización- conversión del resultado integral de la ecuación dentro del sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

4.2.4 Post-procesamiento/ resultados

Una vez realizado el pre-procesamiento y la solución de la simulación se recurre al post-procesamiento, en donde se hace el respectivo análisis de resultados.

Uno de los objetivos principales del post-procesamiento es analizar la calidad de la solución, para esto se deben evaluar los siguientes parámetros, ¿hasta qué punto la solución es independiente de la malla?, establecer si se ha seleccionado el modelo de turbulencia adecuado y si las condiciones de frontera son las adecuadas.

El análisis de los resultados finales puede dar información local y general acerca del flujo. Los programas actuales de CFD como ANSYS-Fluent, brindan herramientas de visualización avanzadas como:

- Visualización de malla y su calidad
- Gráficos de superficie 2D, y gráficos 3D
- Seguimiento de partículas
- Trazados de líneas y contornos
- Distribución de presión, velocidad, temperatura entre otros.
- Animaciones de flujo

- Gráficos de vectores.

Adicional a esto, es posible generar reportes de resultados acerca de información relacionada con los parámetros de simulación, resultados de fuerzas de arrastre y sustentación, coeficientes aerodinámicos, entre otros.

Los resultados obtenidos en esta etapa permiten comprender de mejor manera la interacción entre el fluido y el vehículo, y cómo su forma y configuración interfiere con el flujo del aire. Tres herramientas como son los vectores de velocidad, contornos de presión y líneas de corriente otorgan un primer vistazo de forma más intuitiva que permite comprender mejor el comportamiento aerodinámico.

Vectores de velocidad: si se toman como base los conceptos vistos anteriormente, el poder ver el comportamiento de la velocidad alrededor del vehículo, junto con los contornos de presiones, permiten comprender de mejor manera el comportamiento aerodinámico del auto, ya que se busca que en zonas como la del fondo plano se presenten altas velocidades las cuales tienen un efecto directo en la caída de presión si se mira la ecuación de Bernoulli, que se traduce en un aumento de carga aerodinámica.

Adicional a esto, es vital tener una visión de la estela que se produce por el efecto de la interacción entre el aire y el auto, los vectores de velocidad de igual manera permiten visualizar las zonas del vehículo donde se presenta recirculación de flujo, fenómeno que tiene un efecto directo en el arrastre.

Contornos de presión: es posible obtener contornos de la presión dinámica, estática y la total sobre el vehículo, el programa permite visualizar los contornos de presión por medio de colores en la superficie del auto, cada color representa un valor o rango de presión.

Los contornos de presión son útiles para establecer los puntos de alta y baja presión alrededor del vehículo, ya que las diferencias de esta se pueden traducir ya sea en un aumento de la carga aerodinámica, como en un aumento o disminución del arrastre; este también es útil para la

localización de la entrada hacia los radiadores, donde se busca una zona de alta presión en la cara frontal y otra de baja en la posterior que ayude a extraer el flujo de aire que pasa por estos.

4.2.5 Relación de parámetros

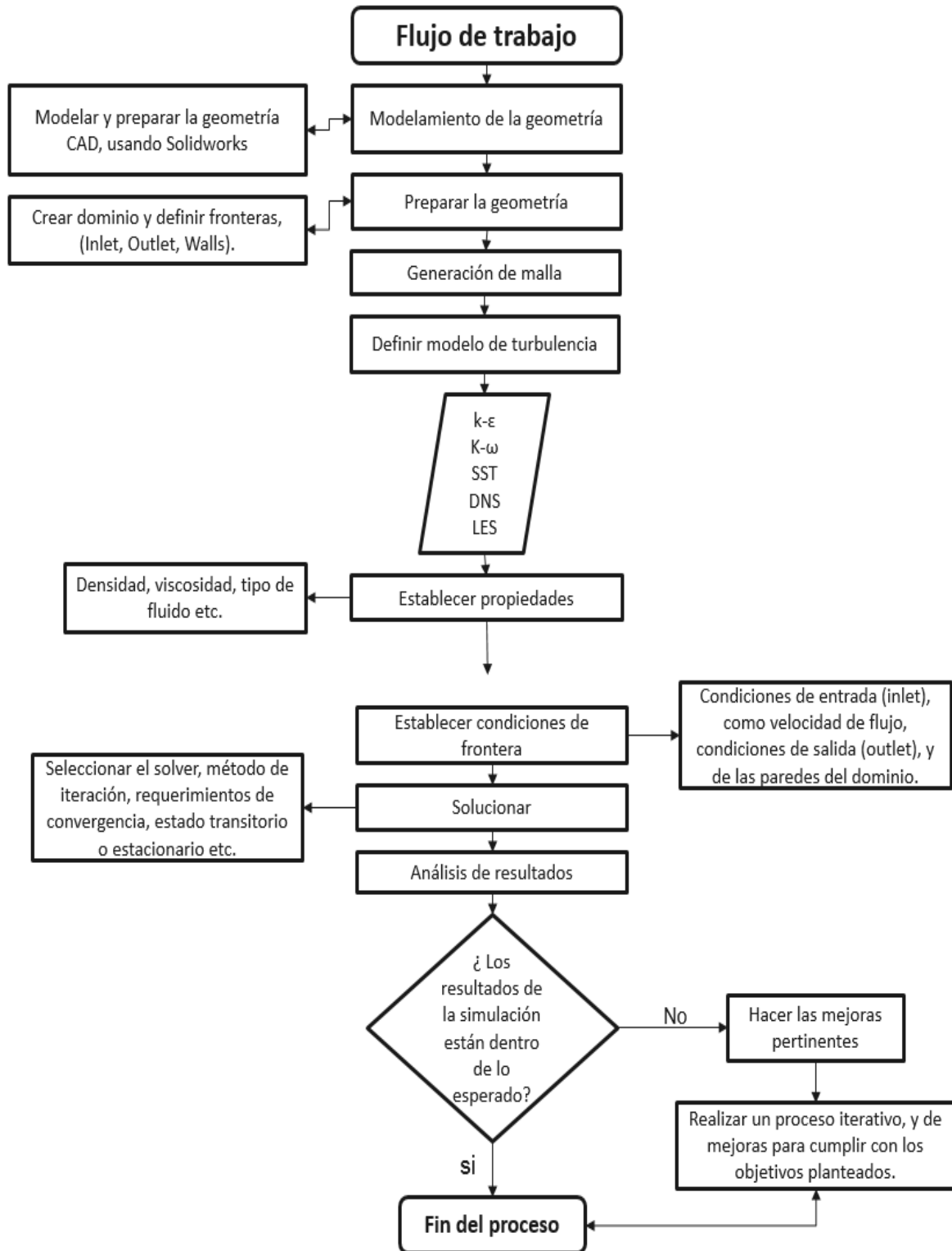
Una vez se han analizado los resultados de la simulación aerodinámica y se han establecido las zonas críticas, es necesario definir según los objetivos del equipo, cuáles son las mejoras que se pueden efectuar sobre el monoplaza; para esto es necesario estimar no solo el tiempo que tarda en efectuarla, sino también los costos que implicaría en el proceso de manufactura.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de simulación es iterativo, una vez se hace un estudio de resultados es posible repetir el proceso cuantas veces se requiera con el fin de mejorar, en este caso, el comportamiento aerodinámico del vehículo, o por otro lado dejar establecidas soluciones para futuros desarrollos.

4.3 Flujo de trabajo detallado

Antes de realizar el proceso de simulación, es necesario tener establecido un flujo de trabajo detallado, esto con el fin de que se pueda replicar el proceso en proyectos futuros, este flujo de trabajo muestra los pasos que se deben desarrollar para obtener la simulación aerodinámica de la carrocería mediante la herramienta FLUENT de Ansys.

Figura 17. Flujo de trabajo detallado



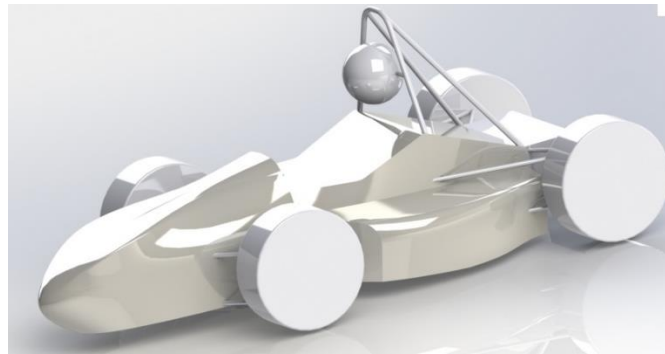
4.4 Set up de la simulación

4.4.1 Configuración de la simulación

- **Geometría**

La geometría del monoplaza previamente desarrollada en Solidworks, se hace bajo los lineamientos y restricciones establecidas por el reglamento, el modelo CAD, como se mencionó anteriormente se simplifica suprimiendo elementos que no son necesarios, o afectan de manera directa el comportamiento aerodinámico del vehículo, eso se hace de igual manera para reducir el costo computacional, y la complejidad de la geometría.

Figura 18. Modelo simplificado



El modelo que se muestra en la figura 18 presenta la morfología completa de la carrocería, llantas, elementos de suspensión y chasis, componentes que influyen directamente en el flujo aerodinámico externo.

- **Dimensiones**

El dominio del vehículo quedó con las siguientes dimensiones:

- Ancho: 16 metros

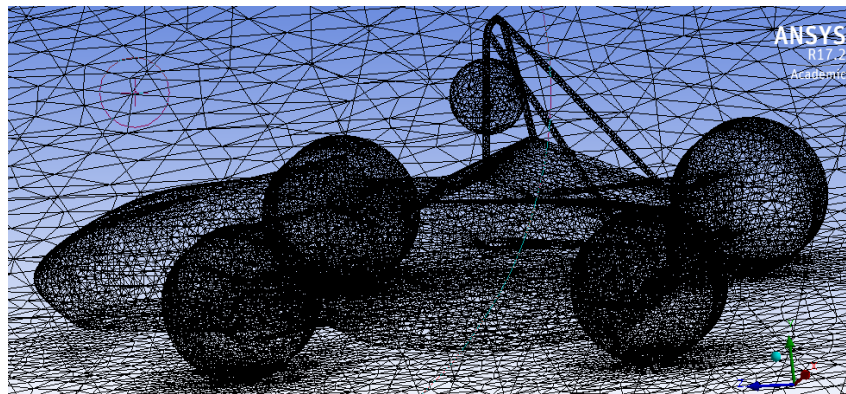
- Alto: 6 metros
- Largo frontal: 6 metros
- Largo Posterior: 23 metros.

La altura respecto al suelo es de 20 mm (medida del suelo a la zona más baja del auto), esta altura se define cumpliendo con las restricciones del reglamento de la competencia; se selecciona buscando tener el vehículo lo más bajo respecto al suelo para bajar el centro de gravedad del monoplaza.

- **Malla**

En este proceso se define el tipo y forma de malla que divide en pequeños elementos el dominio para el análisis, en ciertas zonas los elementos de malla son más pequeños, para adaptarse a los cambios en la superficie, o elementos como los brazos de suspensión, entre otros, la figura 19 muestra el mallado general del vehículo.

Figura 19. Mallado



- **Parámetros de simulación**

La tabla 2 muestra los parámetros de simulación seleccionados para el modelo 3D del vehículo.

Tabla 2: Parámetros de simulación

Presión de referencia	1 atmosfera
Temperatura	300 K
Modelo de Turbulencia	K épsilon - Standard
Condiciones de contorno	
Velocidad de entrada	22 m/s
Presión relativa de salida	0 Pa
Simulación	
Flujo	Transiente
Tiempo de paso	1 e-05 s
Números de tiempo de paso	200
Máximas iteraciones por tiempo de paso	50
Error deseado	1 E-6

4.5 Set up 2D del fondo

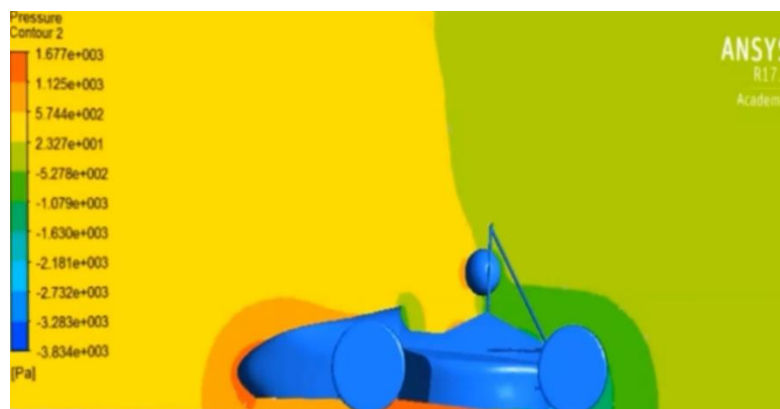
El modelo que se ha simulado no cuenta con un diseño detallado de fondo plano y difusor, su fondo consiste en láminas planas de aluminio, esto con el fin de proteger el habitáculo y también para mejorar el flujo aerodinámico “suavizando” la superficie baja del auto; sin embargo, como se muestra en la simulación, la parte baja presenta una zona de alta presión siendo este un efecto no deseado, ya que interfiere directamente en el arrastre del vehículo. Este comportamiento puede estar relacionado con dos factores:

- Diseño geométrico del elemento
- Proceso de simulación.

Por ende se evaluarán los dos casos. En el primero, se estudiarán los paramentos que pueden incidir directamente en el comportamiento, como la altura respecto al suelo (ride height), o la morfología del elemento; en el segundo caso se analizará el proceso de simulación, específicamente el mallado, con el fin de establecer si el problema se debe a un mal mallado en esta zona o reside en el diseño del elemento.

Es por esto que esta parte se ha seleccionado como una zona crítica, y sobre esta se realizará un proceso iterativo.

Figura 20. Distribución de presión en el fondo plano



Antes de trabajar el proceso de mejora de este elemento del monoplaza, es necesario entender la física detrás de su funcionamiento, este se basa en dos principios físicos: Bernoulli y Venturi. Cuando un fluido es forzado a pasar por un área de sección transversal reducida y cumpliendo con el principio de conservación de la masa, su velocidad se incrementa, esta ganancia en la energía cinética del fluido se ve reflejada en una reducción de presión, de acuerdo al principio de conservación de la energía.

La función del difusor en la parte final del auto y del fondo plano, es incrementar el volumen a lo largo de su longitud, esta área debe ser “llenada” con aire de la parte baja, lo que incrementa la velocidad de flujo que pasa por la garganta, incrementando así la velocidad, creando una zona de baja presión, generando carga aerodinámica. El difusor también incrementa la eficiencia aerodinámica total, ya que al aumentar el área en la parte final, el aire reduce su velocidad a la de la corriente de aire exterior, todo el conjunto de fondo plano y difusor es una de las maneras más eficientes de generar carga aerodinámica ya que no tiene un impacto muy importante en el

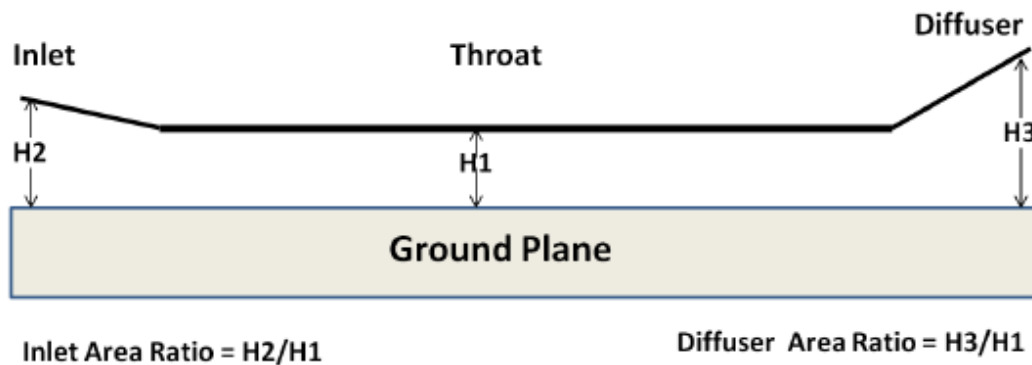
incremento del arrastre, y por otro lado es un elemento que no incrementa el área frontal del monoplaça, como sí lo hacen los alerones [30].

En la práctica, la carga aerodinámica generada por el fondo del monoplaça se ve afectada por:

- Inclinación de la carretera
- Altura respecto al suelo “ride height”
- Diferentes velocidades
- Rugosidad de la carretera
- Aceleración y desaceleración.

En la siguiente imagen se presenta un esquema general del fondo plano de un monoplaça.

Figura 21. Esquema general del difusor

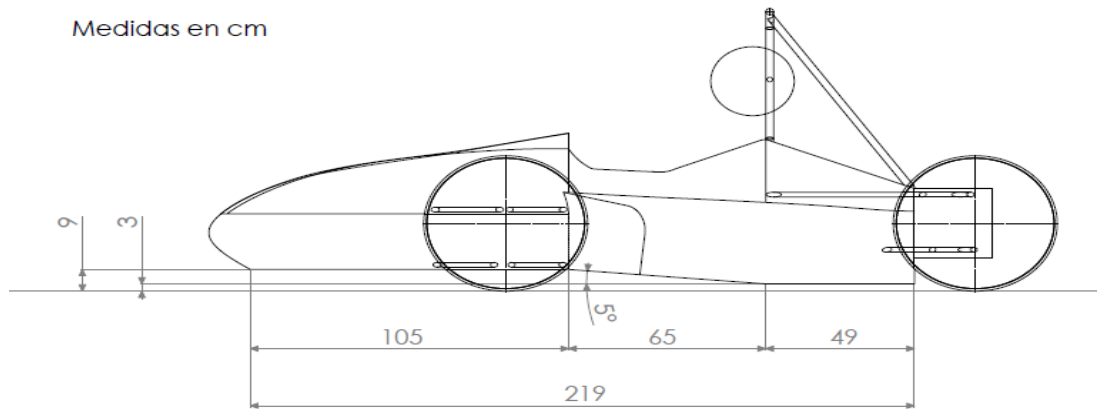


Fuente [31]

Con el objetivo de simplificar el modelo computacional, y enfocarse únicamente en el fondo plano y el difusor, se realizará un modelo 2D que permita ver el comportamiento de las velocidades y presión en el fondo del monoplaça, de igual manera evaluar el comportamiento según el mallado. Para esto se sigue el flujo de trabajo presentado anteriormente, y una vez identificado el problema, se saca el modelo 2D del perfil del fondo inicial del monoplaça.

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones del fondo iniciales, como se mencionó, este modelo inicial no cuenta con un difusor, ya que no estaba contemplado en el concepto inicial planteado por el equipo, a partir de estas dimensiones se saca el modelo 2D para la simulación computacional.

Figura 22. Dimensiones del fondo



Antes de iniciar con la simulación es necesario hacer unas aclaraciones, el análisis 2D no da una idea completa del comportamiento real del fondo y el difusor, esto se debe a que en la vida real, debido a la baja presión que se presenta en el fondo del auto, es posible que ingrese aire exterior al fondo generado así estelas turbulentas, adicional a esto, el flujo de aire se ve afectado por otros componentes como las llantas del monoplaza, la nariz etc.

El análisis 2D se hace específicamente para estudiar el comportamiento de la altura, y ratio de áreas, los resultados que se obtengan sirven como base para el modelamiento 3D de la pieza completa.

4.5.1 Pre-procesamiento

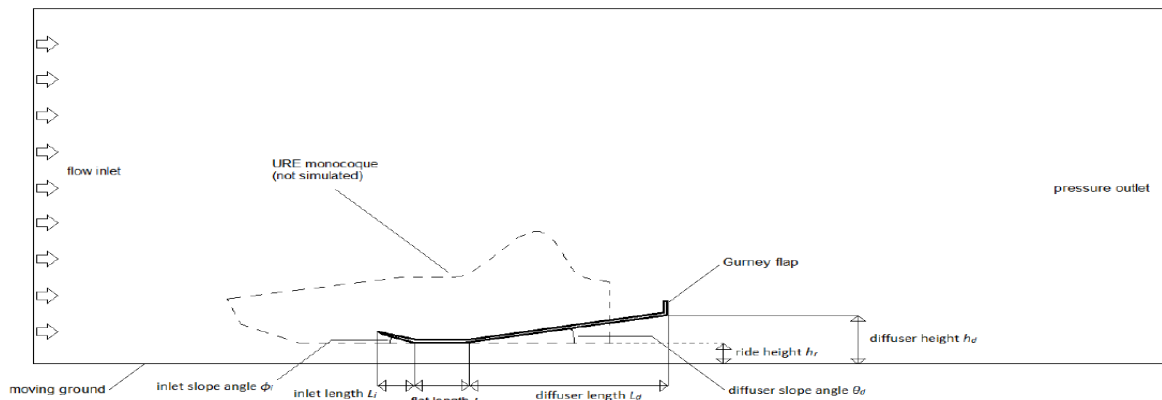
- **Geometría**

La geometría sigue el reglamento de la competencia, sus restricciones dimensionales dictan que ninguna parte del fondo puede sobrepasar la cara externa de las llantas del monoplaza en ancho, la longitud del difusor no puede ir más allá de 250mm detrás de la cara posterior de las llantas traseras; finalmente se restringe el uso de cualquier dispositivo de potencia para impulsar o extraer el aire.

- **Variables**

El comportamiento del fondo plano y el difusor están sujetos a varias variables geométricas, en la siguiente imagen se muestra un esquema del fondo plano y difusor de un formula SAE.

Figura 23. Esquema 2D del fondo plano y difusor



Fuente [32]

Dada la configuración del monoplaza, las siguientes dimensiones permanecen constantes:

- Ángulo de inclinación de entrada (ϕ)
- Longitud de entrada (L_i)
- Longitud plana (L_u)
- Longitud del difusor (L_d)
- Altura de entrada (h_i).

Con relación a la longitud del difusor, es posible variarla siempre y cuando no interfiera con algún componente del auto, o no exceda las dimensiones establecidas en el reglamento; sin embargo, con el fin de reducir el número de configuraciones se hará con la máxima longitud posible.

Los valores que cambian son los siguientes:

- Altura del difusor (h_d)
- Altura respecto al suelo “ride height” (h_r)
- Ángulo del difusor (θ).

La altura del difusor dependerá de su longitud y ángulo.

En los casos automotrices de CFD para las estructuras del fondo y el difusor, debajo de la carrocería, a menudo se usa un cuerpo simplificado conocido como “Bluff body”, cuando la presencia del automóvil completa debe tenerse en cuenta, estos cuerpos pueden aproximar de manera confiable la geometría de los automóviles respecto al efecto suelo; en el caso de un

monoplaza SAE, el espacio en la parte baja por lo general es muy restringido, por ende los túneles usualmente se ubican en los laterales justo debajo de los pontones, y su comportamiento se ve afectado por otros elementos, como se mencionó anteriormente, solo se tendrá en cuenta el efecto que tiene la geometría del fondo y el difusor en el flujo de fluido, para así optimizar su morfología y adaptarla al vehículo.

- **Dimensiones**

Las dimensiones del dominio computacional toman como referencia la longitud del fondo inicial sin difusor, de la siguiente forma:

- Entrada del dominio= 2x2190 mm
- Salida del dominio= 5x2190 mm
- Altura del dominio= 3000 mm

La altura respecto al suelo será inicialmente de 30 mm, buscando mantener el centro de gravedad de monoplaza bajo, evitando también que pueda entrar en contacto con la pista.

- Altura libre “ride height”= 30 mm

Para el modelo original del fondo no se cuenta con un difusor posterior, por lo que se evaluarán distintas alturas de 30 mm a 50 mm. Seguidamente, se analizará el fondo con difusor posterior a distintos ángulos de inclinación y alturas. En la siguiente tabla se muestran las dimensiones iniciales del dominio y las dimensiones del fondo plano y difusor usadas para la simulación.

Los valores no son elegidos al azar, según la literatura relacionada con la simulación computacional de un difusor, ya sea 2D o 3D, un ángulo de entrada más pequeño y un ángulo de salida más grande corresponden a una mayor carga aerodinámica, como resistencia inducida.

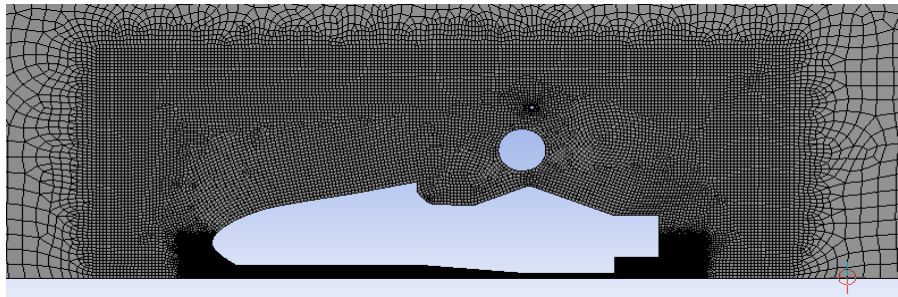
Tabla 3: dimensiones de componentes geométricos

Componentes geométricos	Símbolo	Dimensión
Valores fijos		
Ángulo de inclinación de entrada	ϕ_i	5°
Longitud plana	Lu	490 mm
Longitud de entrada	Li	1050 mm
Altura de entrada	hi	6 mm
Longitud del difusor	Ld	720 mm
Entrada del dominio (inlet)		4380 mm
Salida del dominio (outlet)		10950 mm
Altura del dominio		3000 mm
Valores que se modifican		
Altura del difusor	hd	$L_d \cdot \sin(\theta_d)$
Altura respecto al suelo (ride height)	hr	[30,40,50] mm
Ángulo del difusor	θ_d	[10,15,20]°

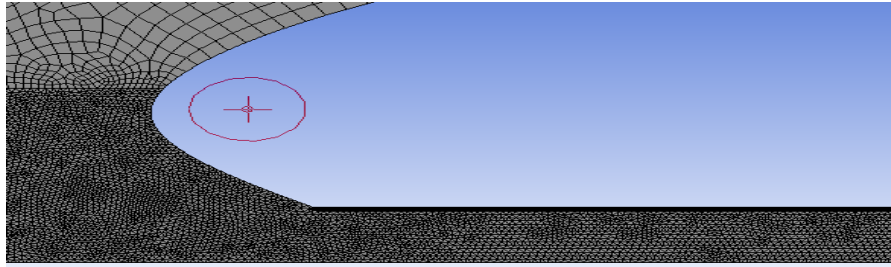
- **Malla**

Todas la simulaciones 2D realizadas para encontrar la altura y ángulo de difusor óptimo, fueron realizadas con dos cuerpos de influencia, uno de estos es usado para el fondo únicamente, el cual cuenta también con un inflation como se muestra en la imagen.

Figura 24. Malla 2D



a)



b)

Tabla 4: Detalles de malla 2D

Detalles de malla	
Defaults	
Physics preference	CFD
Solver preference	Fluent
Sizing	
Size function	curvature
Span angle center	Fine
Max face size	0,1 m
Body of influence 1	
Max face size	0,005 m
Body of influence 2	
Max face size	0,02 m
Statistics	
Nodes	35196
Elements	46303

Todas las mallas para cada una de las simulaciones cuentan con dos cuerpos de influencia y un mallado de la capa limite (inflation) en el fondo, el número de elementos y nodos varía un poco según la configuración del difusor.

- **Modelo de turbulencia**

Para la simulación aerodinámica externa en vehículos, se recomienda usar el modelo K-omega de turbulencia, este es usado para las primeras 100 iteraciones para todas las configuraciones, en primer orden, una vez convergen se usa en segundo orden para 1000 iteraciones.

Para la simulación de los modelos con difusor se usaron de 1000 a 1500 iteraciones buscando la mejor convergencia de los datos, para esto se usó de igual manera el modelo K-omega de segundo orden SST.

- **Velocidad de entrada (inlet)**

Las velocidades en pista de un formula SAE varían entre los 40 km/h a los 100 km/h, para el proceso de simulación se seleccionó una velocidad de entrada de 22 m/s.

Condiciones de frontera y valores de referencia: Para todas las simulaciones se usan las siguientes condiciones de frontera:

- Borde izquierdo del dominio: “velocity inlet”
- Borde derecho del dominio: “pressure outlet”
- Borde inferior del dominio: “no-slip moving Wall”, velocidad igual a la velocidad de entrada
- Borde superior del dominio: “symetry” para evitar congestión del flujo de aire superior
- Fondo “undertray”: “no-slip Wall”

- **Valores de referencia**

Los valores de referencia se mantienen constantes, para cada modelo simulado, además de los valores predeterminados se seleccionaron los siguientes:

Tabla 5: Valores de referencia

Valores de referencia		units
Area	1	m ²
Depth	1	m ²
Lenght	2,19	m

Velocity	22	m/s
----------	----	-----

La longitud se mantiene para el modelo del fondo original, este es el que no cuenta con un difusor, se hará el análisis para evaluar su comportamiento a diferentes alturas respecto al suelo, posteriormente se le añadirá un difusor, lo que incrementará su longitud y se evaluará también diferentes configuraciones geométricas.

Tanto el área como la profundidad se establecieron con los valores unitarios, así todos los valores de fuerza se obtendrán en unidades de Newton por metro (N/m), de esta forma es más fácil comparar los resultados con los valores de la literatura de otros modelos y equipos, también los datos de fuerza se pueden adaptar fácilmente multiplicándolos por el ancho del túnel del difusor.

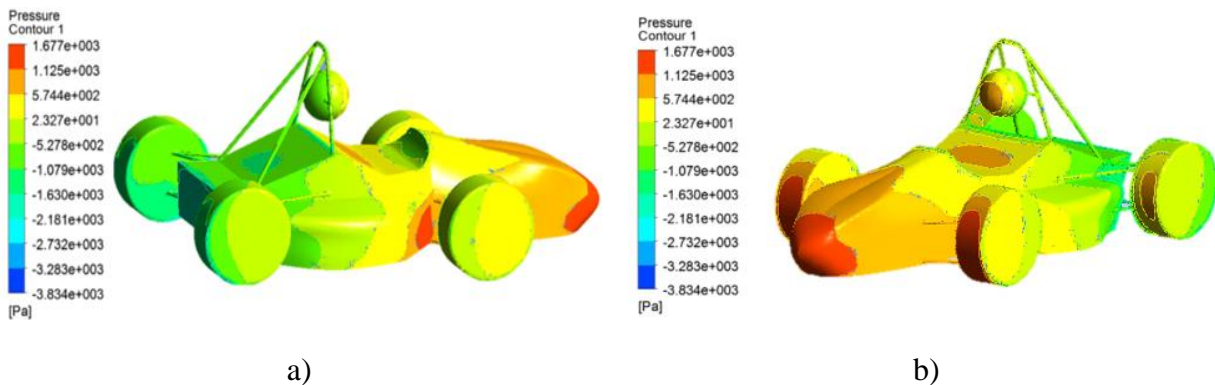
5 Presentación y análisis de resultados

5.1 Simulación 3D

En este apartado se describe el comportamiento de la presión, la velocidad y las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el vehículo.

Se comenzará analizando el contorno de presiones sobre la carrocería como se muestra en la siguiente figura 25.

Figura 25. Contorno de presión



Como se mencionó anteriormente la fuerza de arrastre se presenta principalmente por la diferencia de presiones sobre el objeto y por la fricción del fluido. En este caso la resistencia debida a la presión es la más relevante, como se evidencia en la imagen se tiene una presión elevada en la parte frontal del vehículo y una presión negativa en la parte posterior.

Esta diferencia de presiones causa una resistencia al avance, los elementos que entran en contacto directo con el flujo de aire son los que presentan una mayor presión, esto se debe a la repentina disminución en la velocidad del flujo en estas zonas.

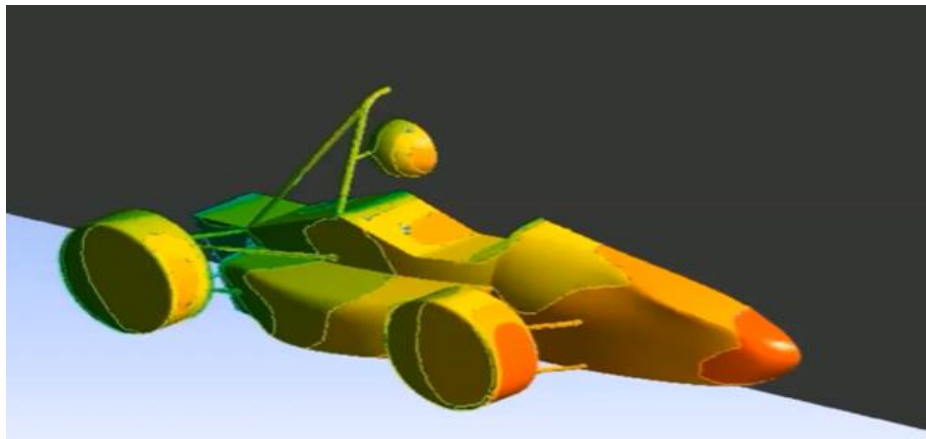
Por otra parte, el análisis del contorno de presiones permite establecer la ubicación para la toma de aire hacia los radiadores. En la imagen 25.a) se ve que la entrada del pontón presenta una zona de alta presión estática ideal para el posicionamiento de los radiadores, aplicando los conceptos teóricos, en los conductos de refrigeración, en este caso para los radiadores se desea que la entrada esté en una zona de alta presión que permita vencer las pérdidas generadas por el paso del flujo a

través del radiador, y que la parte posterior esté ubicada en una zona de baja presión que ayude con la evacuación del flujo caliente.

Un aspecto que requiere especial atención es el fondo del vehículo, donde se busca generar una zona de baja presión, que contribuya a un incremento de la carga aerodinámica, o en su defecto una reducción en la sustentación.

En la figura 26 se muestra La distribución de presión sobre el vehículo, esta responde al comportamiento esperado en donde la zona frontal presenta una elevada presión estática, la cual disminuye su magnitud a medida que el fluido avanza a través del monoplaza, en un vehículo de competición se busca reducir el arrastre con un diseño suave del fondo, de igual manera generar una zona de baja presión en la “garganta”, que contribuya a un incremento en la carga aerodinámica o reduciendo la sustentación positiva haciendo uso del efecto venturi, este modelo no cuenta con un difusor que ayude a incrementar la velocidad de flujo en la parte baja del auto.

Figura 26. Distribución de presiones

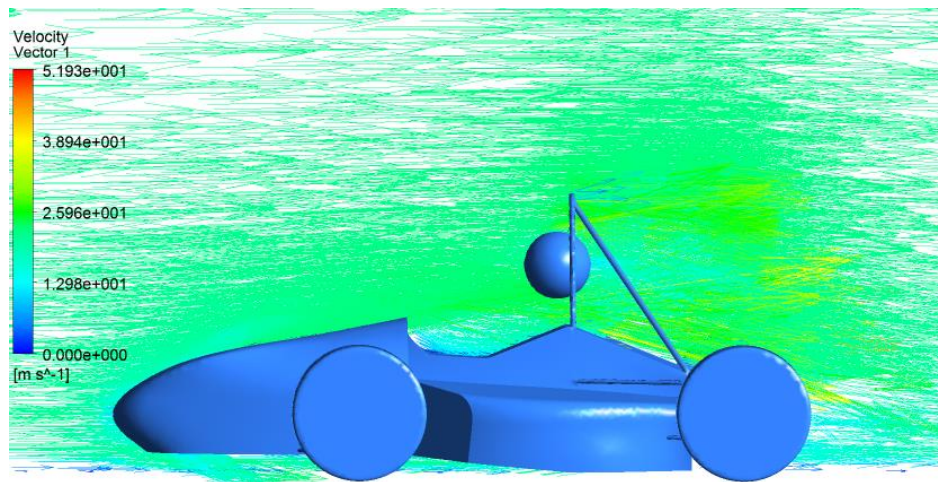


Como se mencionó anteriormente, la configuración del vehículo ocasiona un incremento de la presión en el fondo del auto, lo que afecta o incrementa el arrastre aerodinámico. Esto se debe a varios factores, como la altura respecto al suelo (ride height), ya que el reglamento de la competencia exige una distancia mínima respecto al suelo de 2 cm, siendo esta la configuración actual del vehículo. Sin embargo, esta distancia respecto al suelo al ser tan baja, en vez de contribuir al efecto suelo o incrementar la velocidad del flujo en el fondo del vehículo, se genera en cambio un estancamiento en el flujo de aire incrementando así la presión y afectando de forma negativa en la resistencia aerodinámica.

Por ende, este es, uno de los puntos que se deben trabajar en el modelo, donde algunas de las opciones para mejorar este comportamiento son: a) modificar el set up del vehículo, incrementando su altura libre respecto al suelo, con el fin de mejorar el flujo en la parte baja del vehículo y b) adicionando un difusor en la parte posterior, que ayude a mejorar el rendimiento del fondo. Aun así, se debe establecer un equilibrio entre la altura libre, la elevación del centro de gravedad del vehículo y el comportamiento del flujo en la parte baja, estos factores inciden en el comportamiento dinámico del vehículo. Estas zonas requieren de igual forma un tratamiento más detallado en el mallado.

Este comportamiento se aprecia de igual forma en el contorno de velocidad, adicional a esto es posible ver algunas zonas de recirculación de flujo, ocasionados por cambios bruscos en la geometría que tendrán un impacto en el arrastre final del vehículo. E la figura 27 se presenta un contorno de velocidades, partiendo con un valor de 22 m/s que equivale a una velocidad aproximada de 80 km/h, considerada como la velocidad típica que se alcanza en los circuitos de esta competencia.

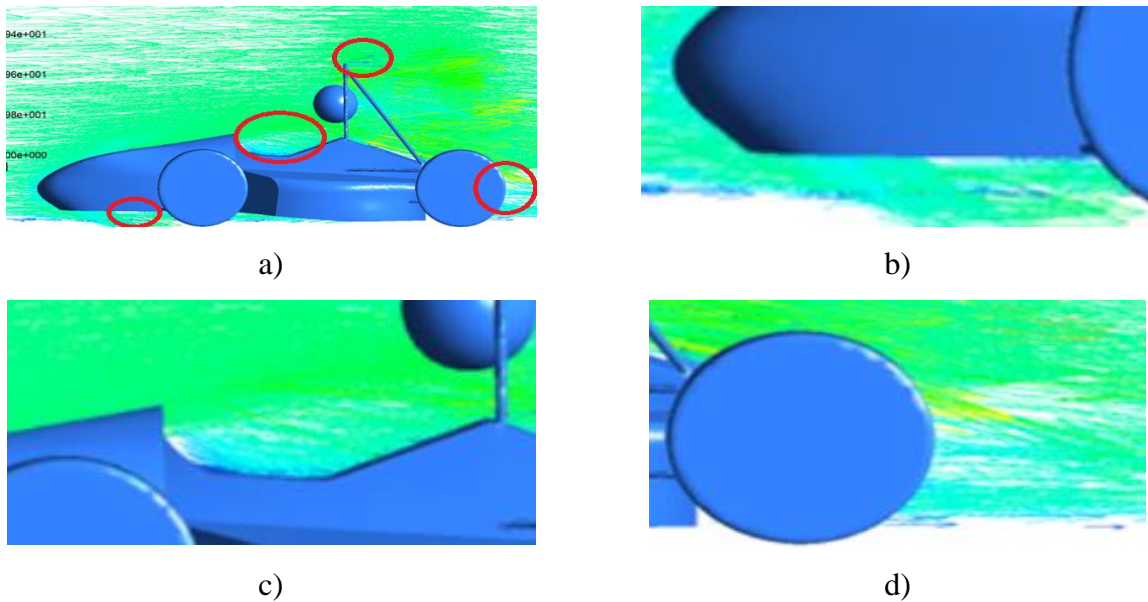
Figura 27. Distribución de velocidad



El contorno de velocidad alrededor del vehículo permite visualizar no solo los puntos de recirculación como se muestra en la figura 28, sino también determinar los puntos de incremento en la velocidad, y el comportamiento general del flujo sobre el vehículo.

Como se muestra en la figura 28, el flujo presenta un buen comportamiento en la parte frontal y sobre la carrocería, este presenta cambios bruscos en la zona del habitáculo, la parte posterior y la parte baja de la nariz, estos cambios bruscos en la morfología afectan directamente el flujo de aire, presentando re circulaciones y desprendimiento de la capa limite.

Figura 28. Zonas críticas



La siguiente tabla 6 muestra el resultado de las cargas aerodinámicas obtenidas a partir de la simulación por medio del método CFD.

Tabla 6. Resultados simulación 3D

Presión Mínima	Presión Máxima
-3,83 kPa	1,67 kPa
Velocidad Mínima	Velocidad Máxima
0 m/s	51, 90 m/s (186,80 km/h)

Fuerza de arrastre (Drag)	Fuerza de sustentación (Lift)
662,50 N Dirección Z	-18,90 N Dirección Y

El arrastre del monoplaça es elevado, sin embargo su valor es típico en este tipo de vehículos de configuración de llantas al descubierto tipo formula (open-wheel), en el que varios elementos como los brazos de suspensión, elementos estructurales del chasis, entre otros, no se encuentran cubiertos con elementos de la carrocería e interactúan directamente con el flujo de fluido.

5.2 simulación 2D

De la simulación anterior se estableció el fondo como uno de los puntos críticos en el comportamiento aerodinámico del monoplaça, a continuación se presentan los análisis de los resultados obtenidos de la simulación de distintas configuraciones del fondo del monoplaça, en las que se evalúa el efecto en la variación de la altura respecto al suelo (ride height), la implementación de un difusor y el efecto de su inclinación en la sustentación y arrastre.

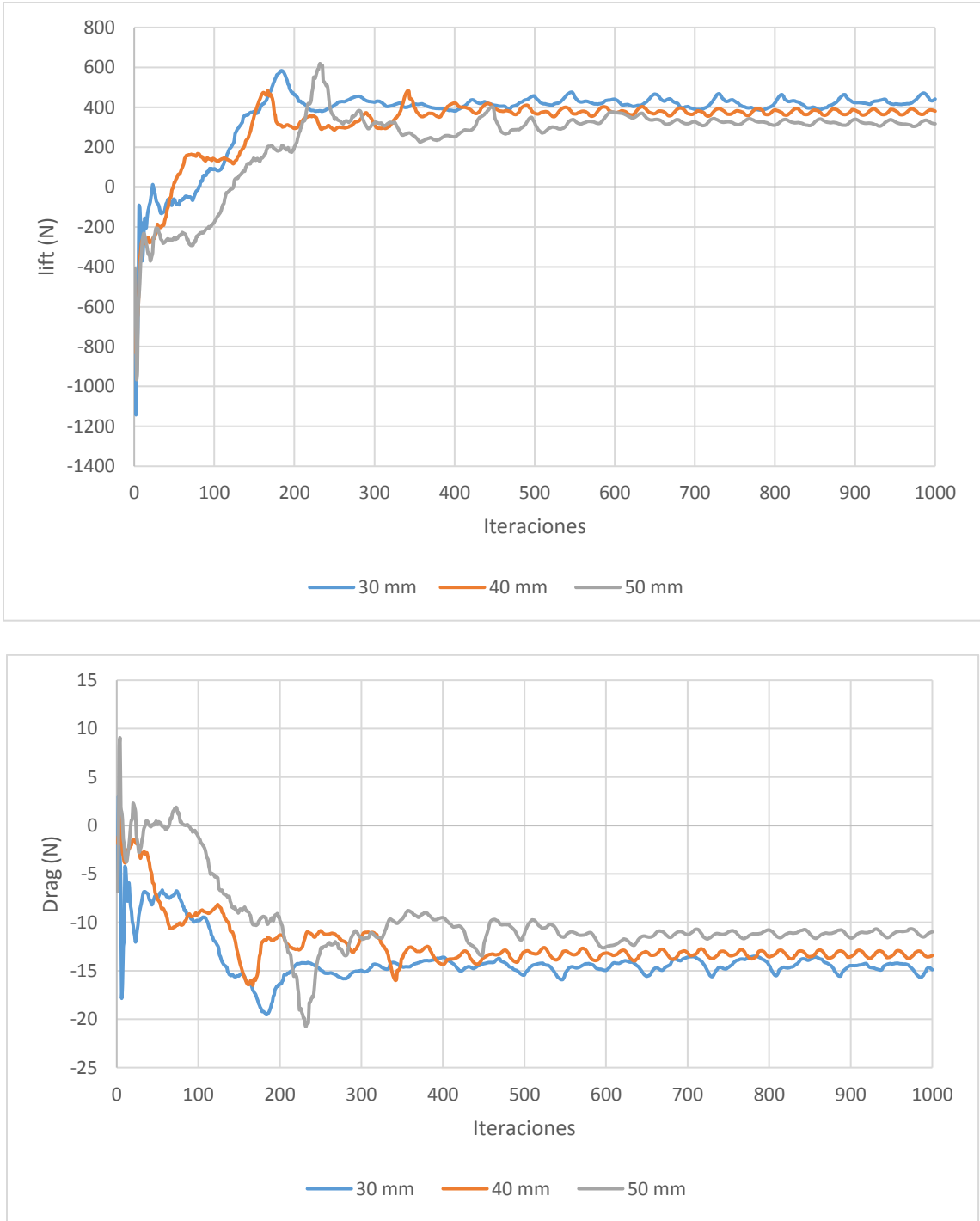
Este análisis se enfoca en el comportamiento del fondo (undertray) y busca establecer una configuración óptima para su futura implementación en el monoplaça.

5.2.1 Análisis de la altura “ride height”

La altura respecto al suelo es uno de los factores que afectan el rendimiento del fondo, la altura mínima respecto al suelo permitida es de 20 mm, sin embargo como se observó en la simulación 3D, una altura tan baja puede afectar el comportamiento del flujo de fluido en la parte baja, de igual manera es poco práctica ya que una altura tan baja podría ocasionar un contacto entre el fondo y la pista generando daños en este componente del monoplaça.

A continuación, se muestran los resultados para distintas alturas (30 mm, 40 mm, 50 mm), esta variación inicial se realizó sin la adición de un difusor, para evaluar el mallado en la parte baja, y el comportamiento en estas alturas. La figura 29 muestra las gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) para cada una de las alturas.

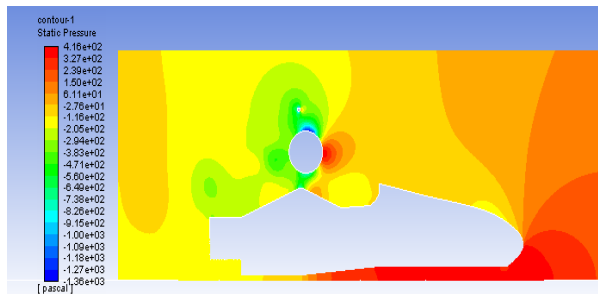
Figura 29. Gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag), a diferentes alturas



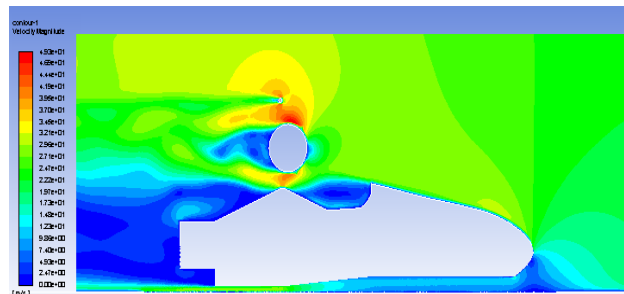
La imagen anterior muestra el valor de sustentación y arrastre para cada una de las iteraciones, estos valores se estabilizan, para las simulaciones mostradas se usó un máximo de 1000 iteraciones. Se observa que para una altura de 30 mm se presenta un mayor valor de sustentación positiva, y a la vez, es la configuración que presenta más arrastre (drag), a medida que se incrementa la altura respecto al seulo, de 30 mm hasta los 50 mm, la sustentación positiva y el arrastre disminuyen.

En la figura 30 se muestra el contorno de presión y velocidad para cada una de las alturas.

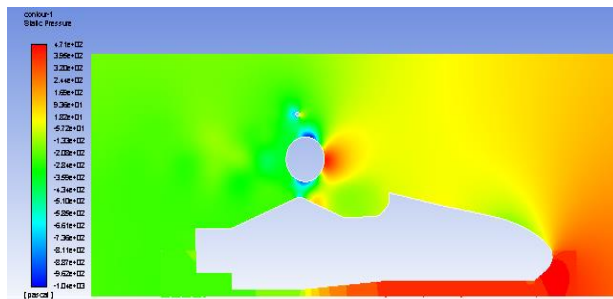
Figura 30. Contornos de presión y velocidad a diferentes alturas



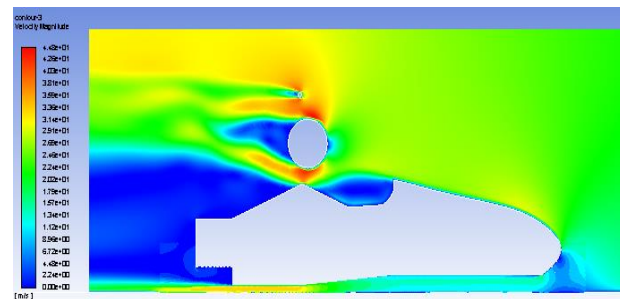
a) Contorno de presión a 30 mm



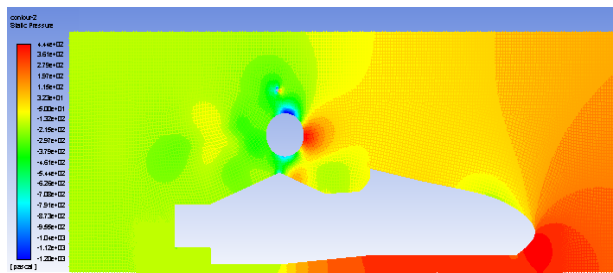
b) Contorno de velocidad a 30 mm



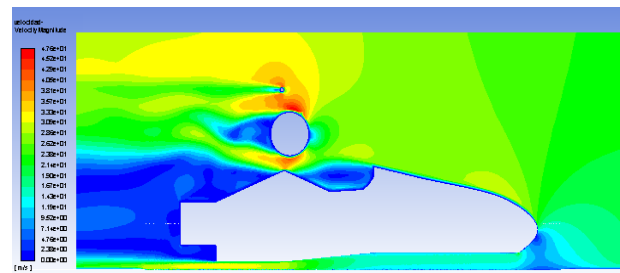
c) Contorno de presión a 40 mm



d) Contorno de velocidad a 40 mm



e) Contorno de presión a 50 mm



f) Contorno de velocidad a 50 mm

A diferencia de la simulación 3D en la que el vehículo se encontraba a 20 mm de altura, al aumentar la elevación a 30, 40 y 50 mm, el contorno de velocidad muestra un mejor flujo de aire en el fondo, adicional a esto la velocidad se incrementa en la zona más “estrecha”, la distribución de presiones sigue siendo similar, caracterizada por una presión estática elevada en la zona frontal del vehículo que se extiende por el fondo, en la zona más estrecha (parte más baja del fondo del monoplaza), se presenta en los tres casos una reducción en la presión leve.

Los resultados de arrastre (drag), y sustentación (lift) se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Arrastre y sustentación a cada altura

Altura "ride height" (mm)	Undertray Drag (N/m)	Undertray Lift (N/m)
30	-14,89	441.08
40	-13.20	373.67
50	-11.36	328.41

Para cada elevación sin la implementación del difusor, se genera en el fondo una sustentación positiva, este efecto se puede atribuir a la elevada presión estática que se presenta. Los valores se dan en (N/m), ya que los valores de referencia seleccionados para la simulación son unitarios, es posible entonces escalar los resultados modificando las dimensiones. Es claro también que, a medida que se incrementa la altura, la sustentación positiva cae y el arrastre se reduce. Efecto que se ve reflejado tanto en el contorno de presión como en el contorno de velocidad en donde, a medida que se incrementa la elevación, la velocidad a lo largo del fondo se incrementa y la presión disminuye.

A continuación se analiza el efecto del difusor en el comportamiento del fondo a cada una de las alturas 30 mm, 40 mm y 50 mm, se busca evaluar qué tanto se reduce la sustentación negativa, y el ángulo adecuado para generar mayor carga aerodinámica.

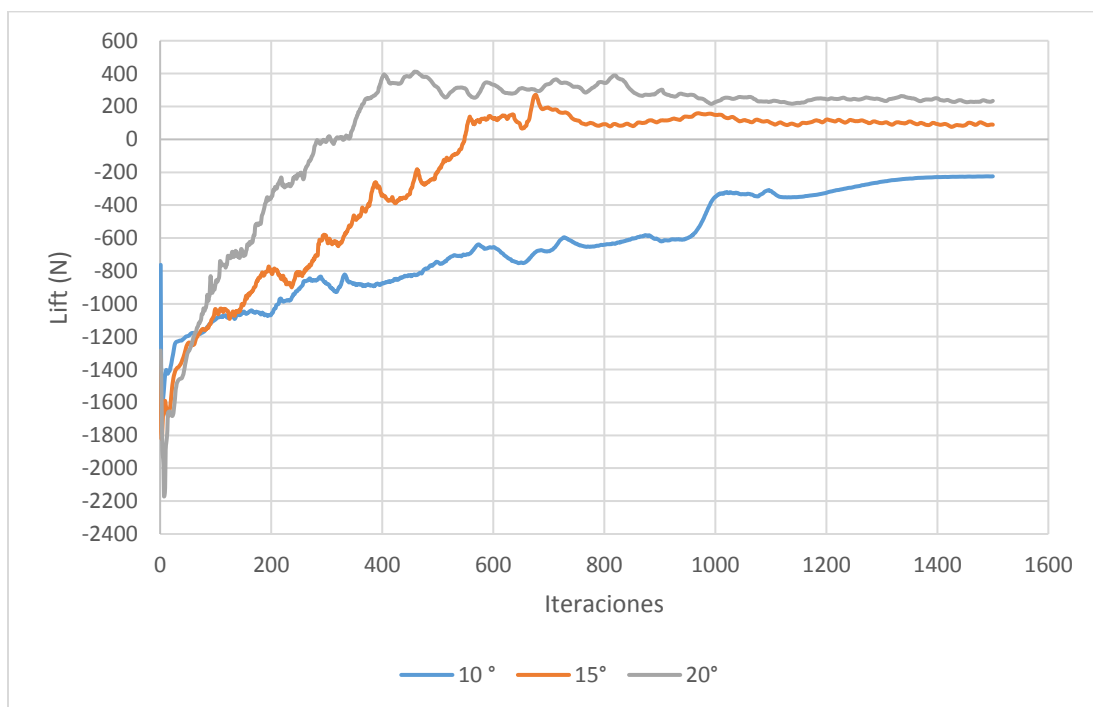
Las alturas de elevación y ángulos de difusor corresponden a dimensiones típicas en vehículos de la competencia formula SAE.

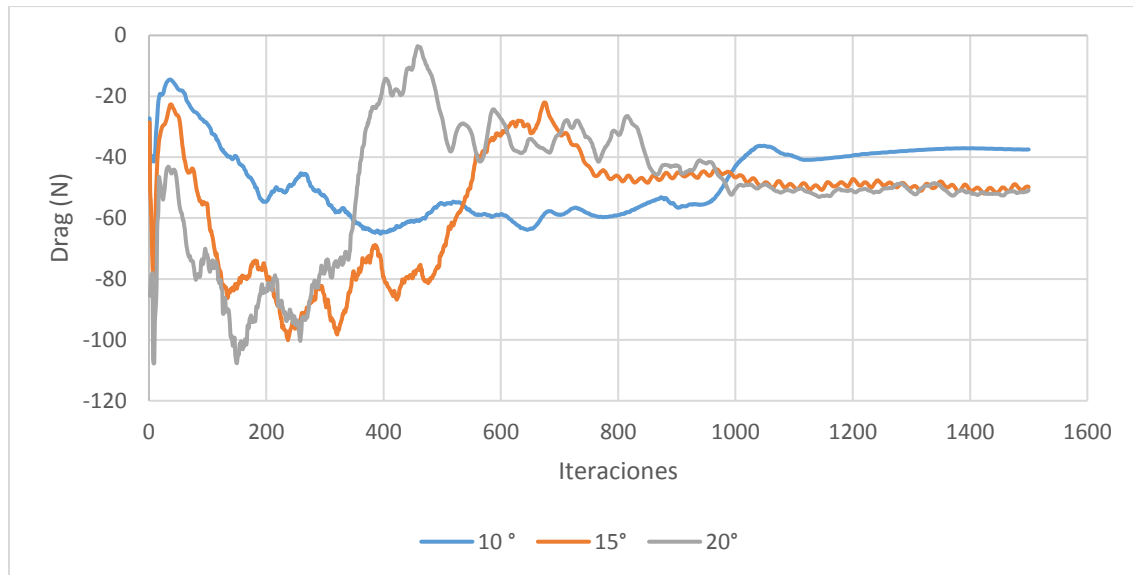
5.2.2 Análisis del ángulo de difusor a 30mm de altura

A pesar que a una altura de 30 mm se presenta el mayor arrastre y sustentación positiva, se analizara el efecto de la implementación de un difusor a distintos ángulos (10, 15, 20), esto se hace ya que esta altura el monoplaza tendrá un centro de gravedad más bajo, por lo que se busca establecer el comportamiento en las distintas configuraciones, y adaptar el vehículo según las condiciones del circuito.

A continuación, en la figura 31 se muestran los resultados de arrastre y sustentación a distintos ángulos del difusor, a una altura de 30 mm, en este caso se usaron 1500 iteraciones buscando que se estabilizaran los valores para la fuerza de sustentación y arrastre de la mejor manera.

Figura 31. Gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) a 30 mm para diferentes grados del difusor

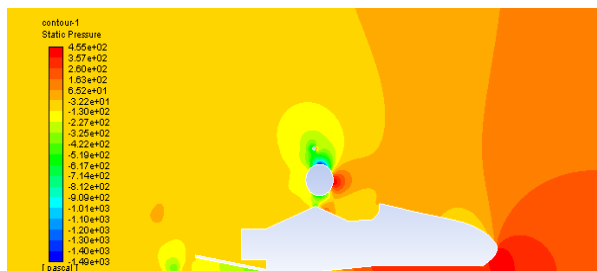




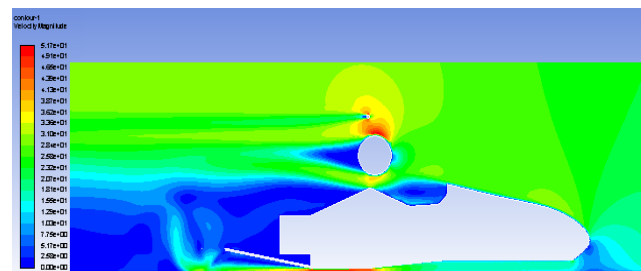
En la imagen anterior se muestran las gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) para cada uno de los ángulos del difusor, a una elevación de 30 mm. Como se observa en la gráfica, se genera sustentación negativa a 10 grados, lo que se traduce en carga aerodinámica, para 15 y 20 grados, a pesar de no presentar valores negativos de sustentación, este, se reduce a los valores obtenidos cuando no se contaba con la implementación del difusor, este ocurre ya que en ambos casos se incrementa la velocidad en el fondo del vehículo.

Los valores se estabilizan a partir de 800 iteraciones hasta alcanzar un valor máximo de 1500. A continuación se muestran los contornos de presión y velocidad para cada uno de los ángulos en estudio.

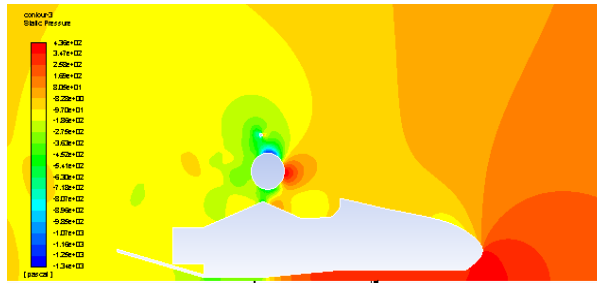
Figura 32. Contornos de presión y velocidad



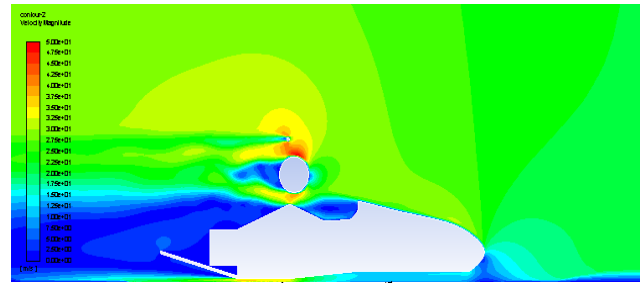
a) Contorno de presión difusor a 10
grados



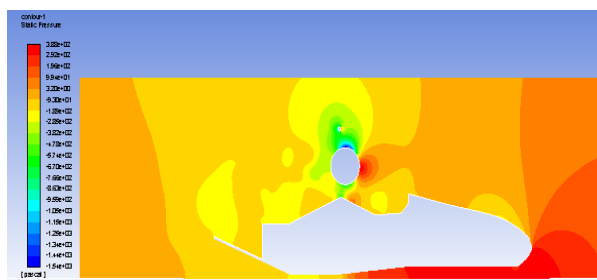
b) Contorno de velocidad difusor a 10
grados



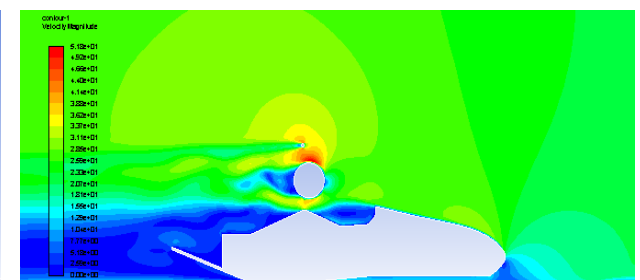
c) Contorno de presión difusor a 15
grados



d) Contorno de velocidad difusor a 15
grados



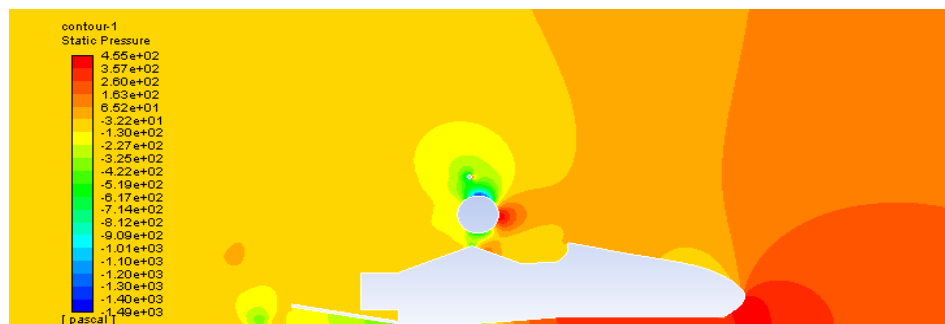
e) Contorno de presión difusor a 20
grados



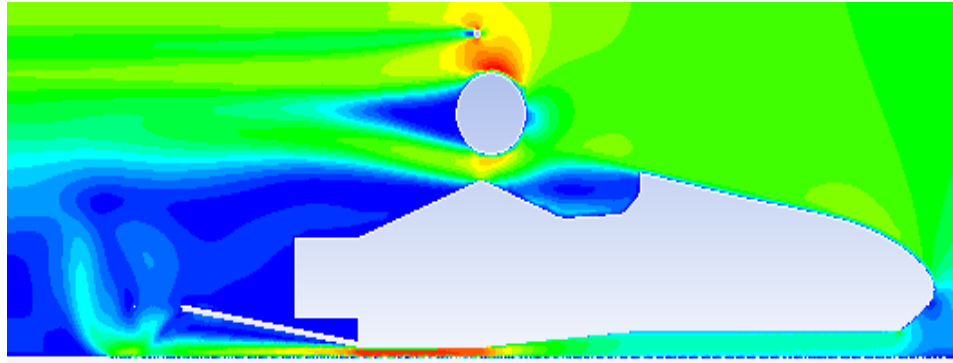
f) Contorno de velocidad difusor a 20
grados

Si bien, la tendencia en la distribución de la velocidad y la presión es similar a los casos anteriores, a 10 grados es posible observar una caída en la presión en la zona baja del fondo. De igual manera se ve un incremento en la velocidad denotada por el color rojo en la parte más estrecha, también es posible observar que el flujo trata de seguir el contorno del difusor, como se muestra en la figura 33 de forma detallada.

Figura 33. Distribución de presión y velocidad a 10 grados y 30 mm de altura



a) Contorno de presión



b) Contorno de velocidad

Este aumento de velocidad en la parte más estrecha del fondo, es lo que se busca para generar carga aerodinámica originada por la caída de presión. De igual manera, se nota cómo el flujo de aire retorna a la velocidad de flujo “libre” después de pasar por el difusor, esto se debe a que el difusor expande el flujo que va por la parte baja del vehículo, hasta la parte trasera, creando entonces una zona de transición, el difusor es un elemento que contribuye al rendimiento total del fondo para generar carga aerodinámica, ya que al crear una expansión, fuerza al aire que pasa por la parte más estrecha del fondo, a incrementar aún más su velocidad, consiguiendo una mayor caída de presión.

La siguiente tabla muestra los valores de lift y arrastre obtenidos para cada ángulo de salida del difusor.

Tabla 7: Arrastre y sustentación a 30 mm para 10, 15 y 20 grados

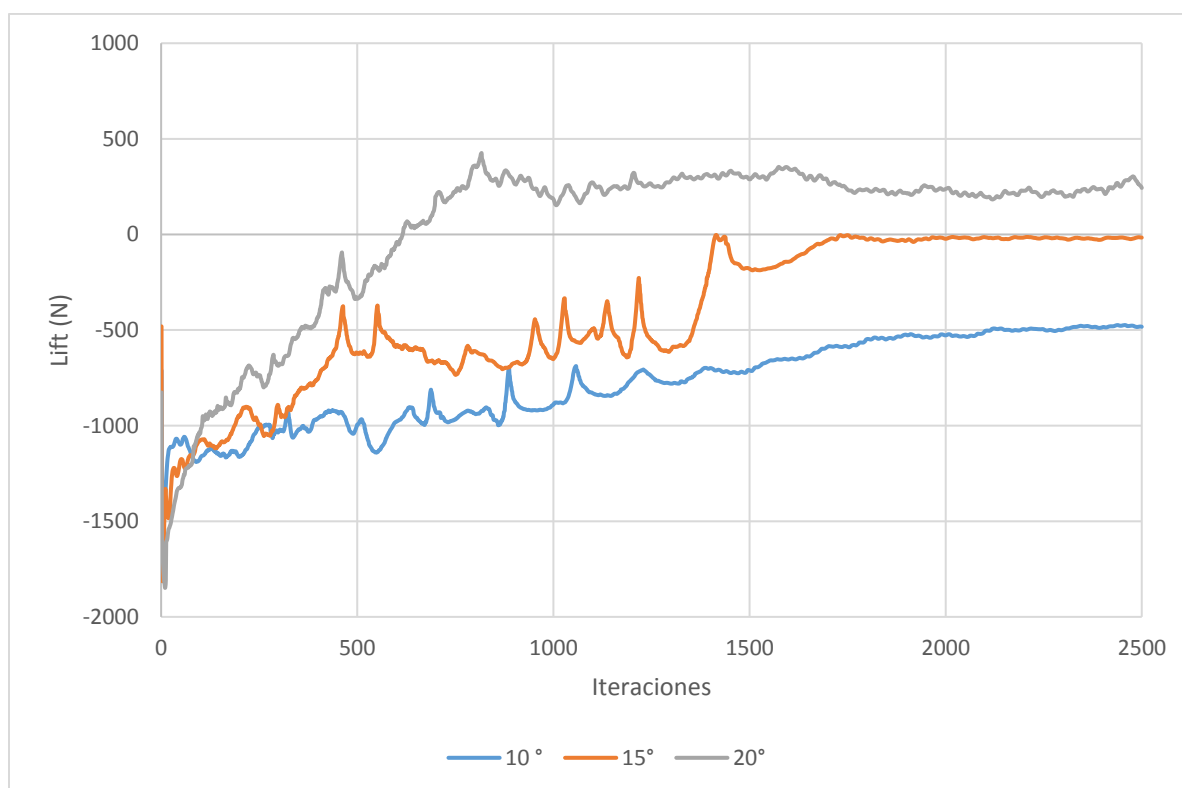
Ángulo del difusor (°)	Undertray Drag (N/m)	Undertray Lift (N/m)
10	-37,47	-224,67
15	-49,81	89,34
20	-50,83	234,45

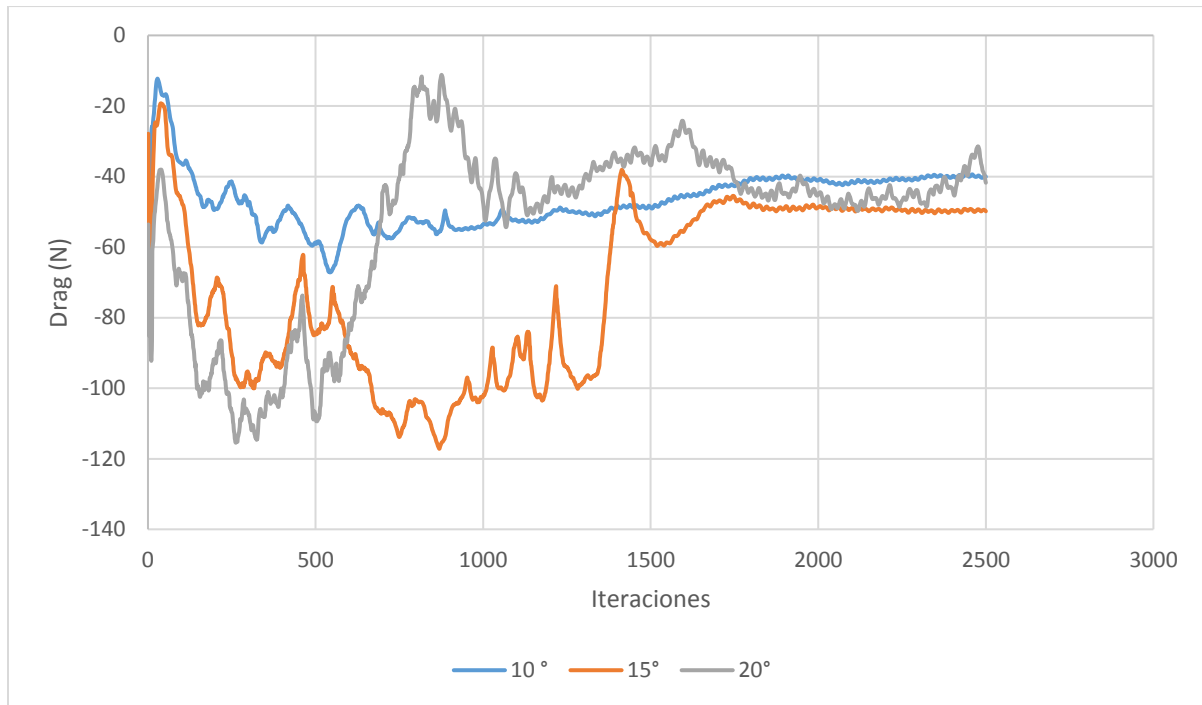
En esta configuración el fondo genera carga aerodinámica únicamente cuando el ángulo es de 10 grados; para 15 y 20 grados se reduce la sustentación en comparación al valor obtenido con una altura de 30 mm sin la implementación del difusor.

5.2.3 Análisis del ángulo de difusor a 40 mm de altura

La simulación para esta configuración se calculó con más de 2500 iteraciones, buscando que los valores estabilizaran de la mejor manera como se muestra en la siguiente imagen.

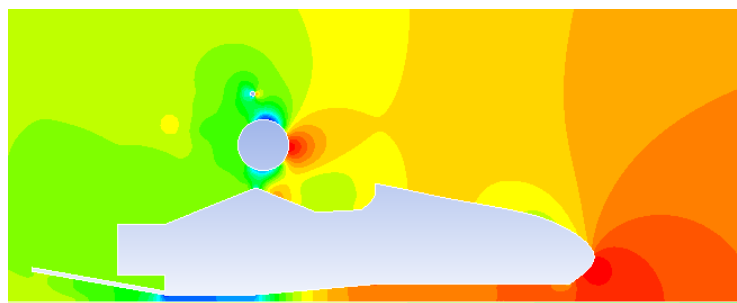
Figura 34. Gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) a 40 mm para diferentes grados del difusor



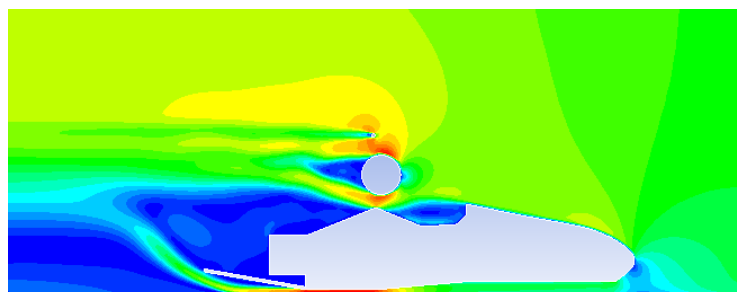


En la figura 35 se presentan los contornos de presión y velocidad Para 10 grados del difusor, a 40 mm de altura.

Figura 35. Contorno de presión y velocidad a 10 grados



a) Contorno de presión



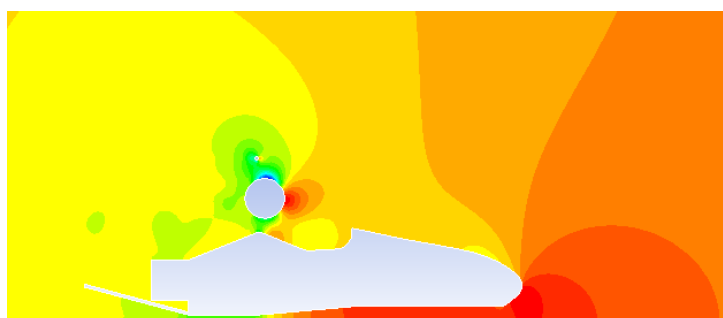
b) Contorno de velocidad

A una altura de 40 mm y 10 grados se evidencia una caída de presión en la parte baja, además el flujo de aire sigue el contorno del difusor donde se presenta un poco de desprendimiento, el aire retorna a la velocidad de fluido libre.

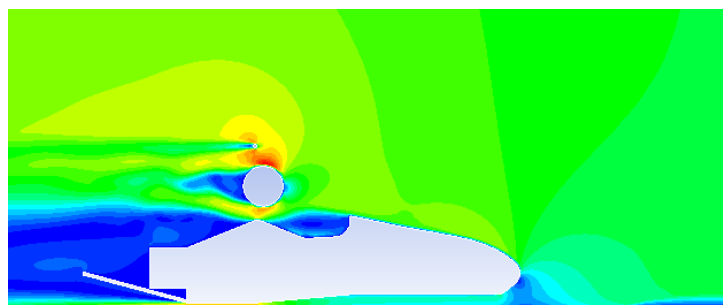
El comportamiento del contorno de velocidad y presión, de la figura 35.a) y 35.b), se asemejan al observado a una altura de 30 mm y 10 grados para el difusor, donde el flujo sigue de mejor manera el contorno del difusor.

En la figura 36 se presentan los contornos de presión y velocidad Para 15 grados del difusor, a 40 mm de altura.

Figura 36. Contorno de presión y velocidad a 15 grados



a) Contorno de presión

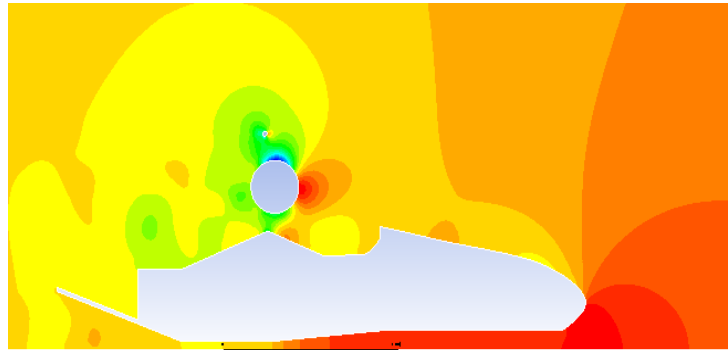


b) Contorno de velocidad

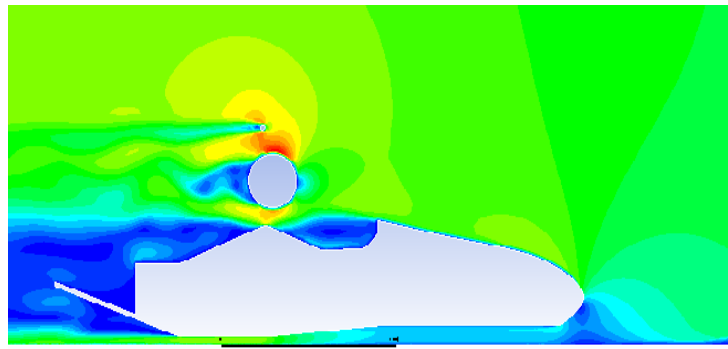
Para esta configuración el flujo de aire ya no sigue de la mejor manera el perfil del difusor, y la velocidad y caída de presión comparado con la configuración anterior es menor. Efecto que se puede atribuir al incremento en el ángulo del difusor, ya que la incrementar, el flujo de aire que pasa por el fondo, ya no sigue el contorno del difusor, presentándose un desprendimiento de flujo, reduciendo la efectividad del elemento.

En la figura 37 se presentan los contornos de presión y velocidad Para 20 grados del difusor, a 40 mm de altura.

Figura 37. Contorno de presión y velocidad a 20 grados



a) Contorno de presión



b) Contorno de velocidad

El ángulo es bastante pronunciado, por lo que no tiene mayor efecto en el flujo de aire en la parte baja, sin embargo en esta configuración se reduce en un 34.90 % la sustentación comparada con la obtenida a 40 mm sin la implementación de un difusor. Los valores de sustentación (lift) y arrastre (drag), obtenidos para una altura de 40 mm, implementando distintos ángulos para el difusor, se muestran en la tabla 8.

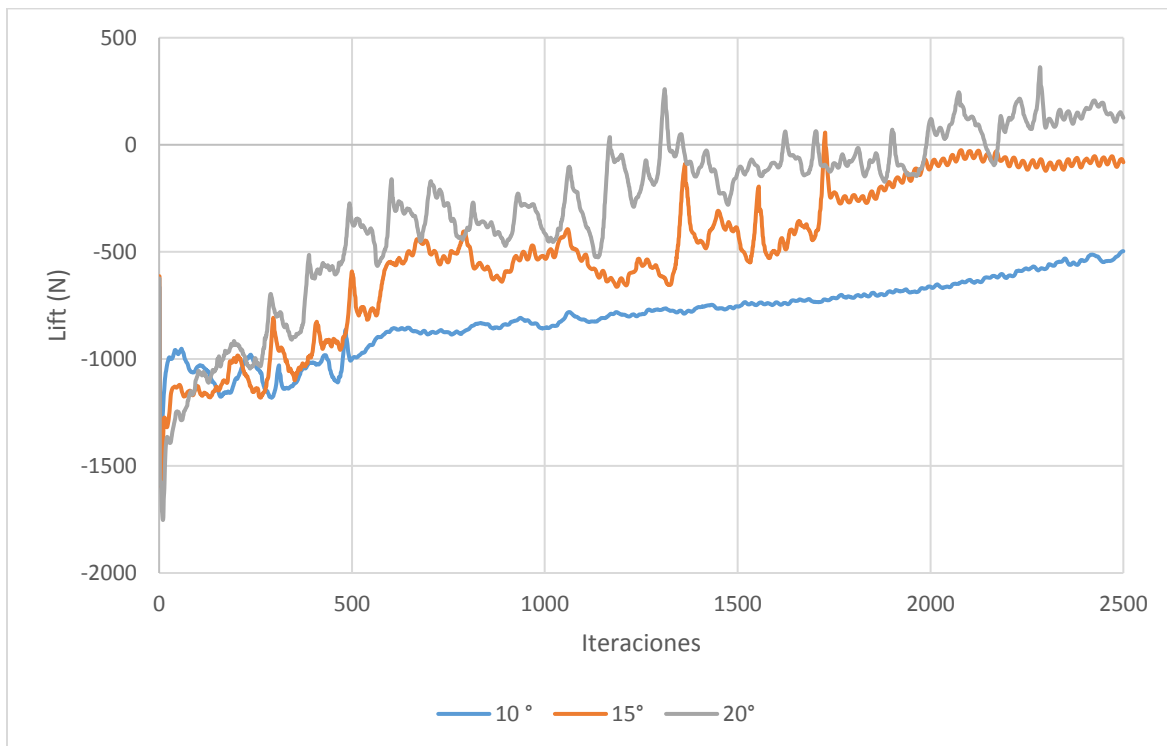
Tabla 8: Arrastre y sustentación a 40 mm para diferentes grados

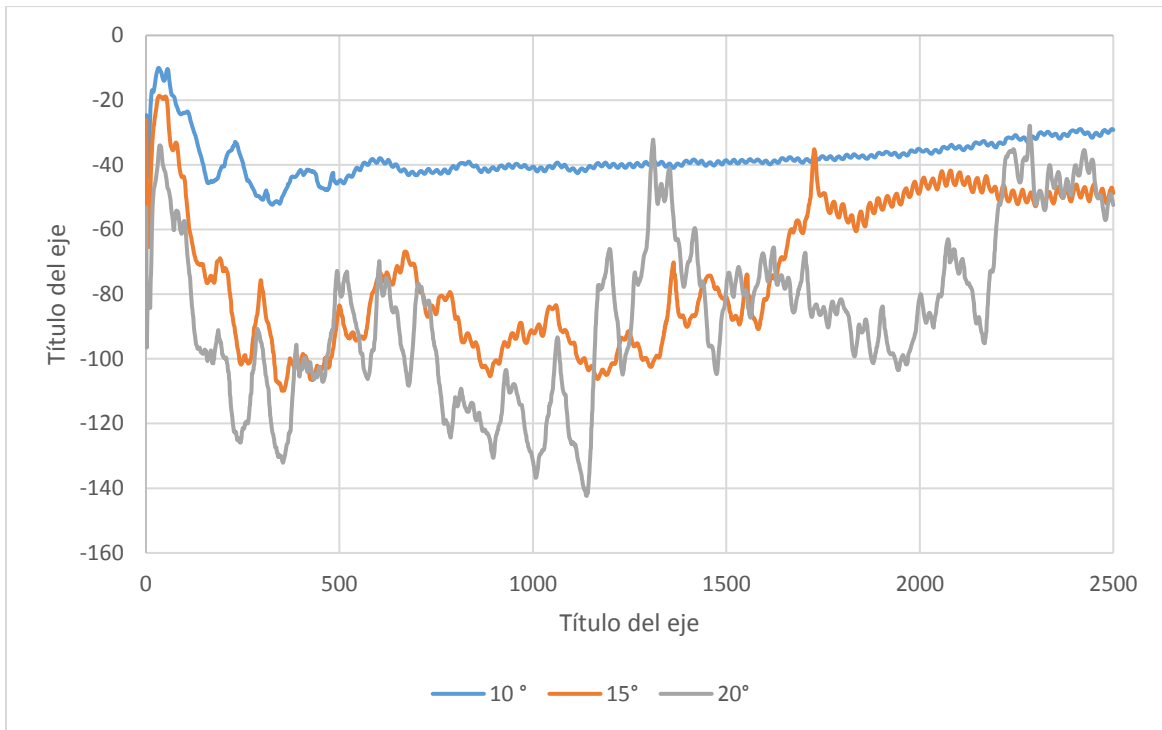
Ángulo del difusor (°)	Undertray Drag (N/m)	Undertray Lift (N/m)
10	-40,06	-482,76
15	-49,88	-18,14
20	-41,75	243,27

5.2.3 Análisis del ángulo de difusor a 50mm de altura

Al igual que en el caso anterior se corrieron las simulaciones a más de 2500 iteraciones.

Figura 38. Gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) a 50 mm para diferentes grados del difusor

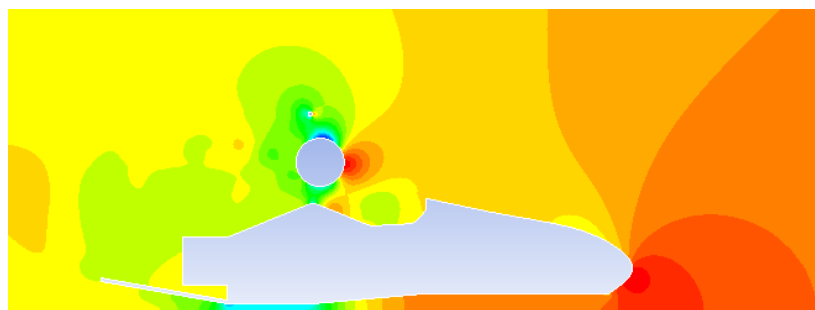




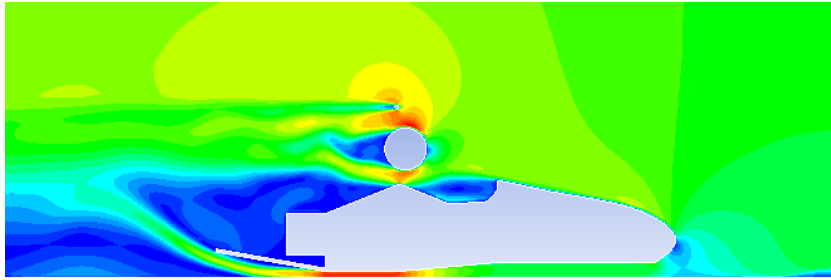
Al igual que el comportamiento del flujo de aire a 10 grados, tanto para 30 mm y 40 mm de altura, en este caso se observa un incremento alto en la velocidad de la parte baja del fondo, y una reducción en la presión. El flujo de aire sigue en gran medida el perfil del difusor aunque se presenta un pequeño desprendimiento, visible por la zona color azul oscuro, a medida que el aire sale del difusor, su velocidad se reduce hasta alcanzar el del flujo libre en la parte posterior del monoplaza.

En la figura 39 se muestra el contorno de presión y velocidad, para una altura de 50 mm y un ángulo del difusor de 10 grados.

Figura 39. Contorno de presión y velocidad a 10 grados



a) Contorno de presión

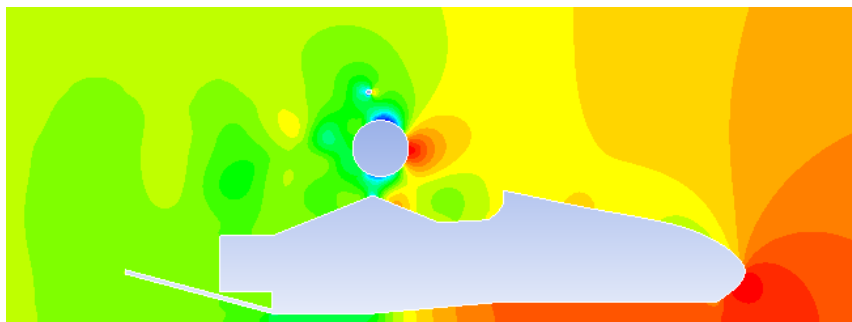


b) Contorno de velocidad

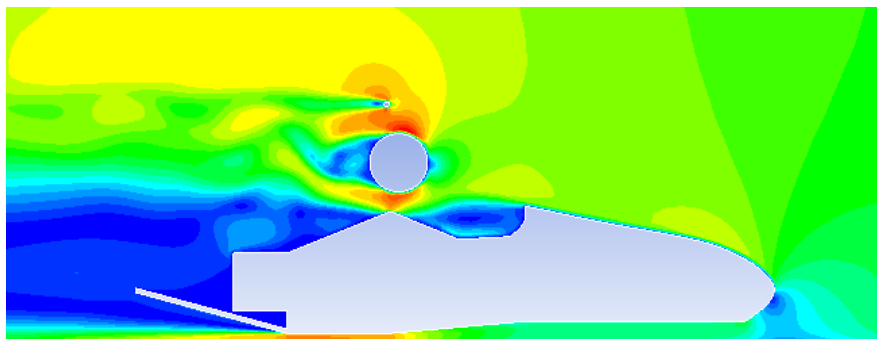
En la figura 40 se muestra el contorno de presión y velocidad, para una altura de 50 mm y un ángulo del difusor de 15 grados.

A diferencia del comportamiento a 10 grados, en este caso el flujo no sigue el contorno del difusor, se aprecia igual una caída de presión y aumento de velocidad en el fondo del auto,

Figura 40. Contorno de presión y velocidad a 15 grados



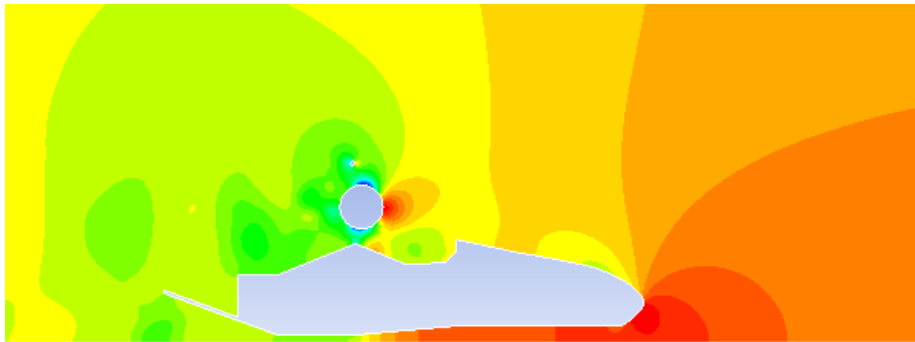
a) Contorno de presión



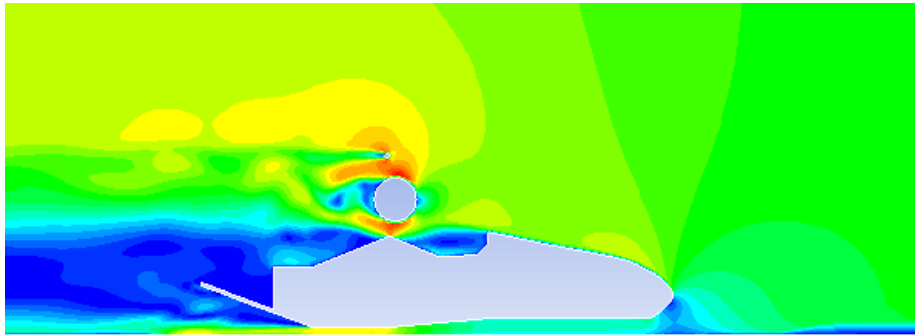
b) Contorno de velocidad

El flujo de aire a 15 y 20 grados tiene un comportamiento similar, en donde debido al grado del difusor, el flujo de aire no sigue el contorno del mismo, sin embargo es posible, por la distribución y contornos de presión y velocidad observar que la velocidad y caída de presión son inferiores a los que se presentan a una altura de 40 mm, como se muestra en la figura 41.

Figura 41. Contorno de presión y velocidad a 20 grados



a) Contorno de presión



b) Contorno de velocidad

La siguiente tabla muestra los valores de arrastre (drag) y sustentación (lift) para cada uno de los ángulos.

Tabla 9: Arrastre y sustentación a 50 mm para 10, 15 y 20 grados

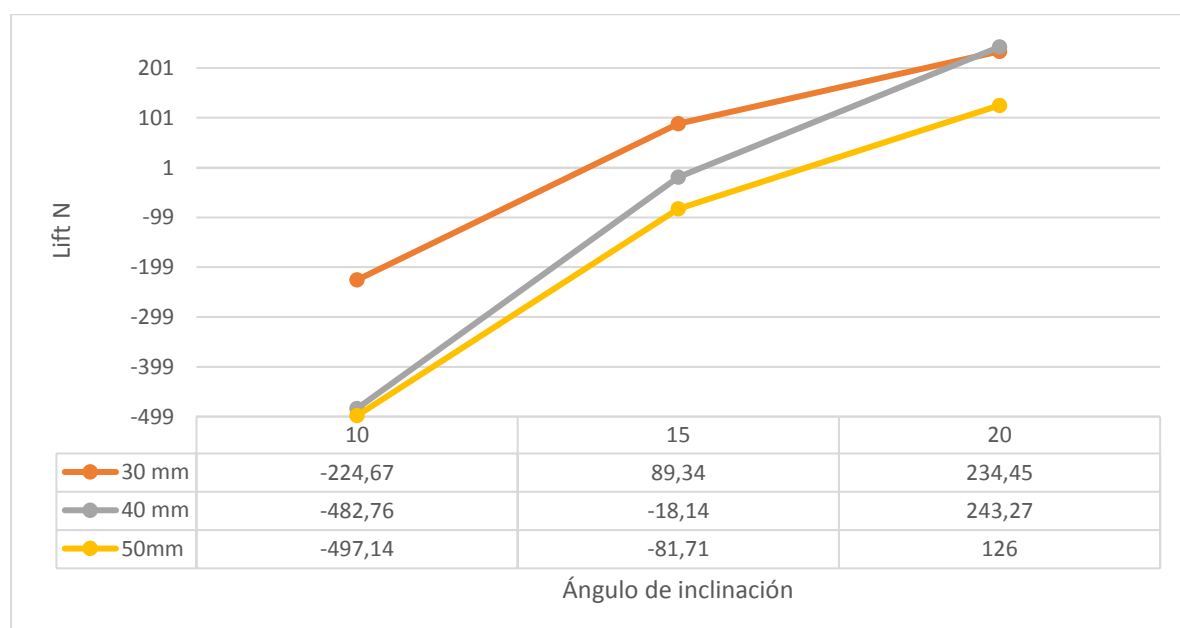
Ángulo del difusor (°)	Undertray Drag (N/m)	Undertray Lift (N/m)
10	-29,24	-497,14
15	-48,76	-81,71
20	-52,43	126

De las distintas configuraciones realizadas, se observa que adicionar el difusor contribuye a una disminución de la sustentación en todos los casos, llegando a generar carga aerodinámica sobre todo a 10 y 15 grados de inclinación. A medida que se incrementa la altura, los valores de carga y reducción de la sustentación se incrementan para cada ángulo, acá es necesario hacer una aclaración, ya se mencionó que reducir mucho la altura, por ejemplo a 20 mm, no es práctico; además un fondo muy bajo respecto a la carretera puede significar una restricción al flujo óptimo del aire. Por otra parte, aumentar la altura de forma considerable puede afectar el comportamiento dinámico del vehículo al elevar el centro de gravedad, de igual manera según la teoría el efecto suelo se reduce al incrementar el nivel entre la carretera y el fondo.

El arrastre en el fondo del auto sin la implementación del difusor en las tres alturas, evaluadas es inferior comparada al arrastre que se presenta en cualquiera de las configuraciones del difusor; este incremento se debe a la separación de flujo. Por otra parte, a medida que se incrementa el ángulo, la carga aerodinámica (lift) o disminución de la sustentación cae, esto se debe a que el flujo de aire no sigue el contorno del difusor haciendo que su eficiencia caiga y los valores de arrastre caigan.

Figura 42 se muestra de mejor manera el comportamiento de las tres configuraciones a 30 mm, 40 mm y 50 mm de altura, con los distintos ángulos de difusor.

Figura 42. Variación de la sustentación (lift), para cada configuración



El ángulo en el cual se presenta la mayor carga aerodinámica es a 10 grados en las tres configuraciones, el objetivo en este tipo de vehículos es generar la mayor carga posible, y ya que las velocidades máximas por lo general no superan los 100 km/h en pista, el arrastre no es tan relevante, los valores mostrados corresponden únicamente al fondo “undertray”, estos valores están asociados a unos valores de referencia unitarios.

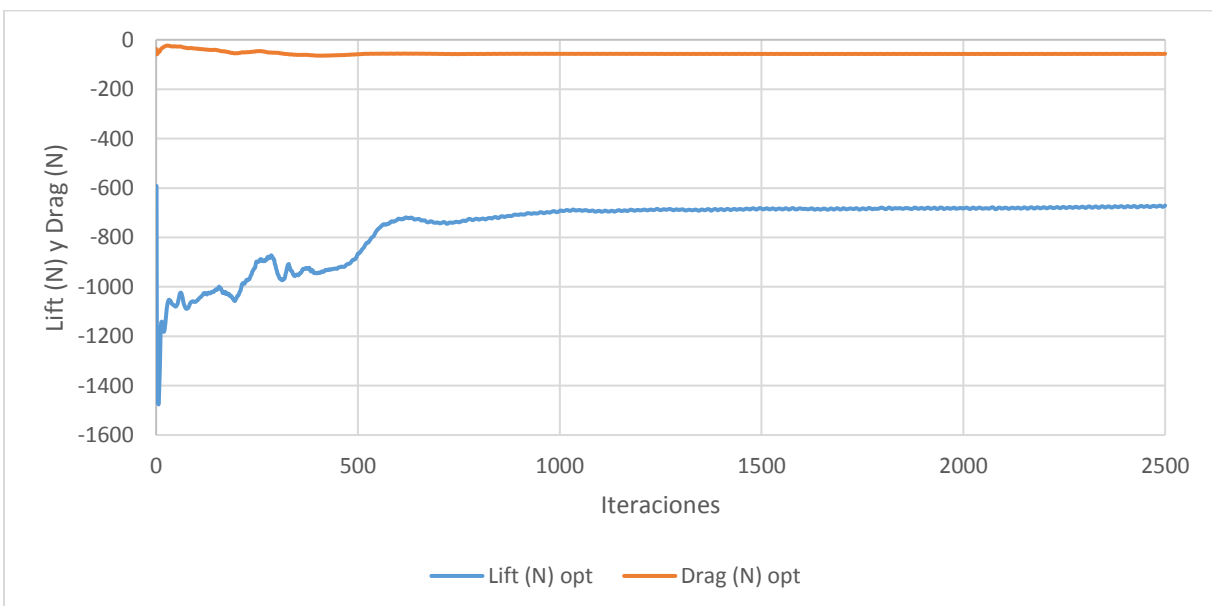
Para la configuración final del fondo, se selecciona una altura de 40 mm con un difusor a 10 grados, esto se hace buscando la configuración que produzca la mayor carga aerodinámica con el centro de gravedad más bajo, es por esto que no se selecciona la configuración a 50 mm, donde la diferencia en el lift es de 14,38 N.

5.2.4 modificaciones morfológicas del fondo

Buscando optimizar de mejor manera la configuración seleccionada, se realizaron unas modificaciones en la morfología, que consistieron en aplicar unos redondeos en los cambios de sección del fondo, de igual manera se modificó la nariz del auto, suavizado su forma, todo esto buscando un mejor flujo de aire en la parte baja, y minimizando los cambios bruscos en la geométrica para que el aire siga de mejor manera el perfil del difusor, incrementando la velocidad en la parte más estrecha, generando así mayor carga aerodinámica.

La figura 43 muestra las gráficas de sustentación (lift) y arrastre (drag) a 2500 iteraciones.

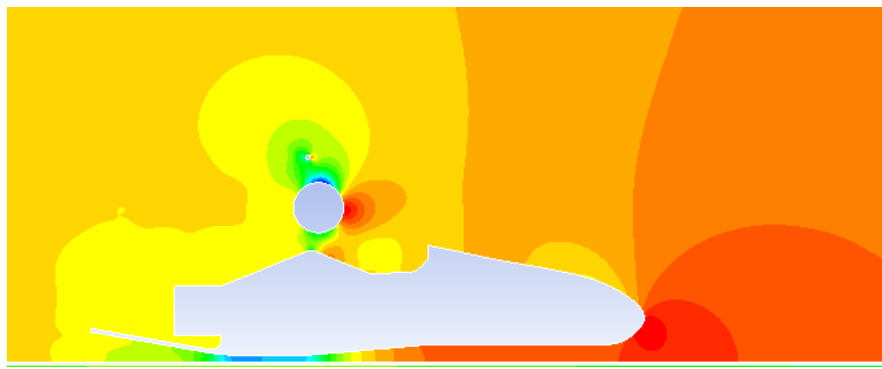
Figura 43. Gráficas de lift y arrastre a 40 mm para 10 grados con los cambios morfológicos.



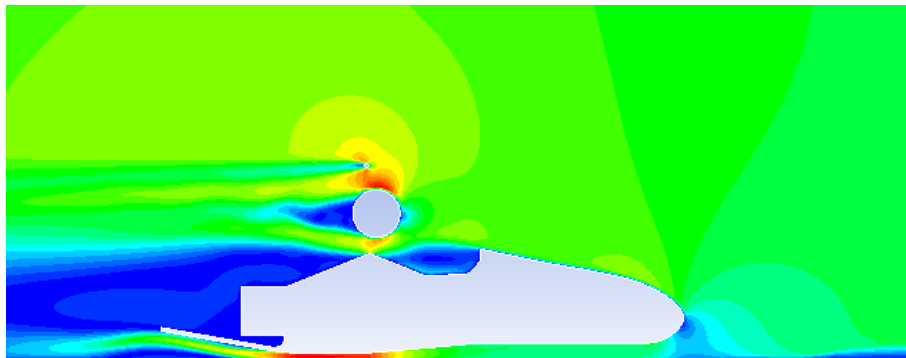
Los valores de lift y drag se estabilizan a partir de 1000 iteraciones, a diferencia de las demás configuraciones del fondo con difusor, en las cuales los valores de sustentación y arrastre se estabilizaban a más de 1500 iteraciones. Esto se puede atribuir a los cambios morfológicos del fondo, con los que se consigue reducir las transiciones bruscas en la geometría, lo que permite un mejor flujo del aire.

En la figura 44 se muestran los contornos de presión y velocidad para una altura de 40 mm, y un difusor a 10 grados, de las modificaciones morfológicas realizadas.

Figura 44. Contorno de presión y velocidad



a) Contorno de presión



b) Contorno de velocidad

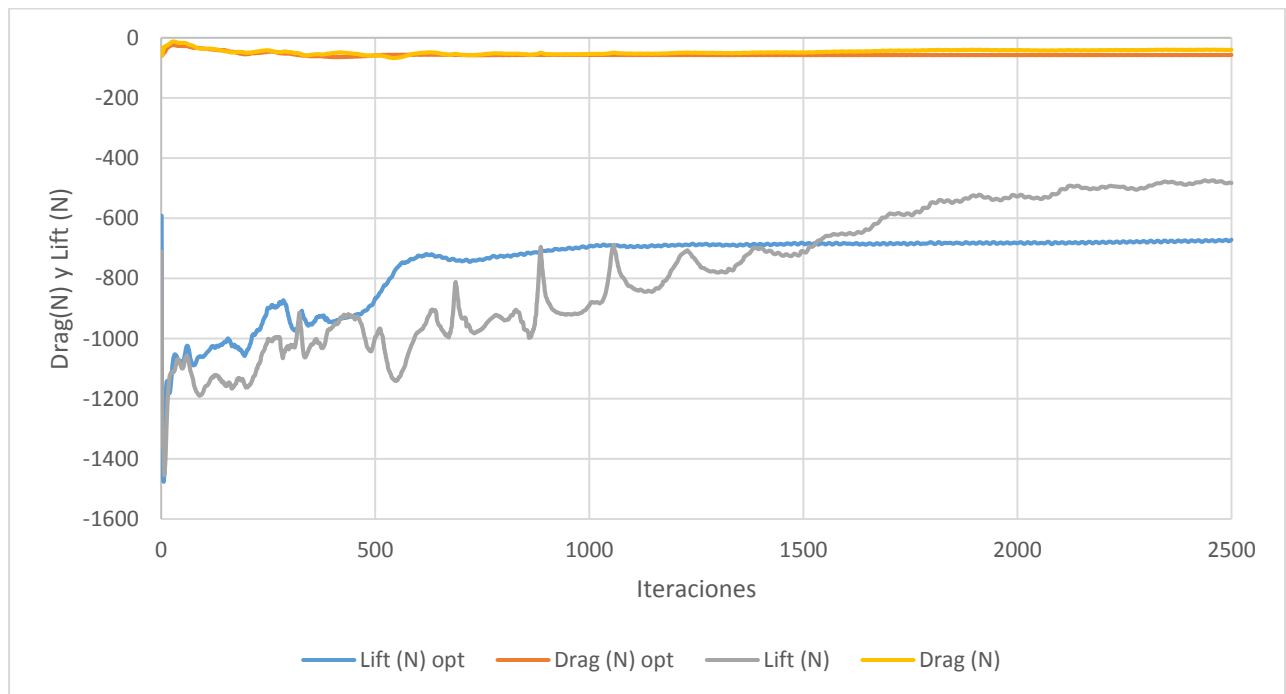
Las modificaciones realizadas permiten que el flujo de aire siga de mejor manera el contorno del fondo, la optimización en la morfología permite un incremento del 28% en la carga aerodinámica, este aumento se ve reflejado de igual manera en el arrastre.

Tabla 10: comparativa modelo seleccionado y optimizado

Modelo	Ángulo del difusor (°)	Undertray Drag (N/m)	Undertray Lift (N/m)
Modelo inicial	10	-40,06	-482,76
Optimización	10	-56,88	-671,27

La siguiente figura muestra la comparación entre el modelo inicial y el modelo que presenta los cambios morfológicos.

Figura 45. Comparativa del fondo inicial, con el fondo que presenta los cambios morfológicos



Finalmente se debe aclarar que estos valores pueden variar en el modelo real, ya que el flujo en la parte baja del vehículo se ve afectado por varios factores como son, la rugosidad de la carretera, las llantas y otros elementos, de igual manera la diferencia de presión entre el aire que rodea el vehículo y el que circula por la parte baja (que se encuentra a menor presión), puede generar que fluya aire de la zona de mayor a menor presión afectando el rendimiento del difusor y el fondo del auto.

6 Conclusiones, recomendaciones y aportes

6.1 Conclusiones

Se diseñó la carrocería de un vehículo formula SAE, cumpliendo con las restricciones y pautas establecidas por el reglamento de la competencia, adicional a esto se definió el alcance del proyecto, en donde se estableció el presupuesto y disponibilidad para el desarrollo del monoplaza.

Basados en los conceptos aerodinámicos estudiados, el arrastre de un vehículo se ve afectado principalmente por su forma, área frontal y distribución de la presión sobre toda la superficie, si se duplica el área frontal, se duplica la resistencia, y si se duplica la velocidad -en teoría- las fuerzas aerodinámicas se cuadriplican.

El vehículo se diseñó entonces buscando reducir el área de referencia, y con una morfología tal que la distribución de presión fuera la más óptima. Los modelos de turbulencia seleccionados para la simulación son el K- ϵ y K- ω SST, siendo estos los modelos más usados para el análisis aerodinámico y dinámica de fluidos en general. Ya que se adaptan a las necesidades respecto al análisis de flujo externo sobre un vehículo y son apropiados para la transición de un flujo laminar a turbulento, como también la separación de flujo. Además, no demandan elevados recursos computacionales.

Se estableció un flujo de trabajo detallado para el proceso de simulación computacional en la herramienta Fluent, definiendo cada paso del proceso de simulación, con el objetivo de ser replicado en las distintas iteraciones en el proceso de diseño y simulación, también se establecen las pautas para simulaciones futuras.

Se determinaron las fuerzas aerodinámicas de monoplaza, bajo una velocidad de 22 m/s, de igual manera se realizó un proceso de optimización en el fondo del vehículo, siendo este una zona crítica en el comportamiento del flujo de aire, en el cual se determinó que la configuración óptima para el monoplaza corresponde a una elevación de 40 mm respecto al suelo con un difusor a 10 grados de inclinación, con lo que se consigue reducir la sustentación y mejorar el flujo de aire en la zona baja del auto y crear carga aerodinámica.

6.2 Recomendaciones

Basado en el trabajo investigativo, el proceso y resultado de las simulaciones, y la bibliografía consultada, se plantean algunas recomendaciones enfocadas en el mejoramiento de trabajos y desarrollos futuros en el área de aerodinámica vehicular y optimización de elementos aerodinámicos como el fondo plano y morfología general del monoplaza.

6.2.1 Geometría del fondo y difusor

A continuación se dan algunas recomendaciones para el diseño y la optimización de la geometría del fondo.

- Los resultados obtenidos corresponden a una geometría 2D, se recomienda, realizar una simulación 3D del fondo para evaluar los efectos que generan los distintos componentes del auto sobre el rendimiento del fondo y el difusor.
- Suavizar los cambios bruscos en la geometría, contribuyen a un mayor flujo del aire y rendimiento del elemento.
- Si bien el rendimiento del elemento está sujeto a la configuración del vehículo, se recomienda manejar un ángulo de salida del difusor entre los 10 grados y 15 grados, ya que para valores muy elevados se presenta separación de flujo y un incremento en el arrastre inducido.
- Se recomienda una elevación respecto al suelo superior a los 30 mm e inferior a los 50 mm, permitiendo un buen flujo de aire en la parte baja, manteniendo un centro de gravedad bajo.

6.2.2 Simulación

- Los modelos de turbulencia se seleccionaron con base en referencias bibliográficas, enfocadas en el estudio aerodinámico de vehículos, si se desea tener un análisis del comportamiento de los modelos de turbulencia, se recomienda ejecutar la simulación bajo

los distintos modelos disponibles, y evaluar la variación en los resultados y tiempos de simulación.

- Una validación experimental, por ejemplo en un túnel de viento, es recomendado para evaluar el comportamiento del monoplaça en un entorno real, y validar los resultados con las simulaciones computacionales.

6.3 Aportes

El trabajo presentado aporta el diseño morfológico de la carrocería para el primer vehículo formula SAE desarrollado en Colombia, cumpliendo con todos los parámetros establecidos por la competencia, elaborado bajo los principios aerodinámicos presentados en el documento.

Se plantea un flujo de trabajo detallado para el desarrollo de una simulación aerodinámica de flujo externo para un vehículo de competición, este flujo de trabajo se establece con el fin de poder ser replicado para futuros proyectos relacionados con el tema. Este presenta todas las etapas de simulación como son el pre-procesamiento, solución, post-procesamiento y presentación de resultados.

Finalmente se realiza un análisis a las fuerzas aerodinámicas a las que está sometido el monoplaça, estableciendo las zonas críticas que influyen directamente en el comportamiento aerodinámico, de igual manera se optimiza la configuración del fondo y el difusor, dejando pautas para futuros desarrollos.

7. Referencias

- [1] SAE International, “Formula SAE rules 2019” versión 1.0 25 July 2018.
- [2] William F. Milliken and Douglas L. Milliken, “Race Car Vehicle Dynamics”, SAE International, 1995, pág. 83-85.
- [3] Chen Fu, Mesbah Uddin, A. Clay Robinson, “Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a NASCAR Gen 6 racecar”, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2018.
- [4] SAE International, “Formula SAE rules 2019”, pág 25, versión 1.0 25 July 2018.
- [5] SAE International, “Formula SAE rules 2019”, pág 25, versión 1.0 25 July 2018.
- [6] SAE International, “Formula SAE rules 2019”, pág 67-68, versión 1.0 25 July 2018.
- [7] Juan Fernando Pauta Solano, Miguel Leonardo Sánchez Ramírez, “Diseño y Construcción de la Carrocería De Un vehículo De Competencia Formula SAE”, pagina 110-152, Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [8] J. Katz, “Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance”, Massachusetts, Cambridge: Bentley Publishers, pág 35-36 1995.
- [9] Simon McBeath, “Aerodinámica del Automóvil De Competición”, CEAC, pág 38, 2000.
- [10] William F. Milliken and Douglas L. Milliken, “Race Car Vehicle Dynamics”, SAE International, pág 539, 1995.
- [11] William F. Milliken and Douglas L. Milliken, “Race Car Vehicle Dynamics”, SAE International, pág 541, 1995.
- [12] J. Katz, “Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance”, Massachusetts, Cambridge: Bentley Publishers, pág 46, 1995.
- [13] Simon McBeath, “Aerodinámica del Automóvil De Competición”, CEAC, pág 34, 2000.
- [14] J. Katz, “Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance”, Massachusetts, Cambridge: Bentley Publishers, pág 263, 1995.

- [15] J. Katz, "Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance", Massachusetts, Cambridge: Bentley Publishers, pág 48, 1995.
- [16] J. Katz, "Race Car Aerodynamics Designing for Speed Engineering and Performance", Massachusetts, Cambridge: Bentley Publishers, pág 263, 1995.
- [17] Ioannis Oxyzoglou, "Design & Development of an Aerodynamic Package for a Fsaе Race Car", University Of Thessaly, 2017.
- [18] Malalasekera, h. k. "an introduction to computational fluid dynamics the finite volume method", second edition. pearson prentice hall, pág 1-7, 2007.
- [19] Bengt andersson, r. a. "computational fluid dynamics for engineers", cambridge university press, pág 1-4, 2012.
- [20] Shames, i. h. (s.f.). "Mecánica de fluidos", tercera edición, mcgraw-hill, pág 316, 1995.
- [21] William F. Milliken and Douglas L. Milliken, "Race Car Vehicle Dynamics", SAE International, pág. 97-98., 1995
- [22] Carlos Andrés bayona castro, l. p. "Identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño del vehículo urbano de la competencia shell eco maratón", bogotá, pág 44, 2015.
- [23] Carlos Andrés bayona castro, l. p. "identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño del vehículo urbano de la competencia shell eco maratón", bogotá, pág 45, 2015.
- [24] Bengt Andersson, r. a. "computational fluid dynamics for engineers", cambridge university press, pág 25, 2012.
- [25] H K Versteeg and W Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics the finite volume method", Second edition, Pearson Prentice Hall, pág 3, 2007.
- [26] Ioannis Oxyzoglou, "Design & Development of an Aerodynamic Package for a Fsaе Race Car", University Of Thessaly, pág 38, 2017.
- [27] Sneh Hetawal, Mandar Gophane, Ajay B.K, Yagnavalkya Mukkamala, "Aerodynamic Study of Formula SAE Car", ELSEVIER, 2014.

[28] Punith Doddegowda, Aleksandr L. Bychkovsky and Albert R. George, “Use of Computational Fluid Dynamics for the Design of Formula SAE Race Car Aerodynamics”, SAE technical paper series, 2006.

[29] Carlos Andrés bayona castro, l. p. “Identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño del vehículo urbano de la competencia shell eco maratón”, bogotá, pág 48-62, 2015.

[30] Xin Zhang, Willem Toet, Jonathan Zerihan, “Ground Effect Aerodynamics of Race Cars”, Applied Mechanics Reviews, 2006.

[31] Girish Bangalore Jalappa, “Design and optimization of undertray for formula SAE race car using cfd analysis”, the university of texas, pág 7, 2015.

[32] D.H.J. Willemsen, “CFD-based aerodynamic optimisation of a 2D race car diffuser”, Eindhoven University of Technology, pág 8-19, 2012.